

RAPORTTEJA  
RAPPORTER  
REPORTS

No. 2020:2

METSÄPALOKESÄ 2018 MUUTTUVASSA  
ILMASTOSSA – POIKKEUKSELLINEN  
VUOSI VAI UUSI NORMAALI?

Ilari Lehtonen  
Ari Venäläinen

Ilmatieteen laitos  
Meteorologiska institutet  
Finnish Meteorological Institute

Helsinki 2020

**ISSN 0782-6079**

**ISBN 978-952-336-108-9 (pdf)**

**<https://doi.org/10.35614/isbn.9789523361089>**

**Helsinki, 2020**



Julkaisija Ilmatieteen laitos <i>Erik Palménin aukio 1</i> PL 503 00101 Helsinki		Julkaisusarjan nimi ja numero Raportteja 2020:2
		Julkaisuaika Toukokuu 2020
Tekijät Ilari Lehtonen ja Ari Venäläinen		
Nimeke Metsäpalokesä 2018 muuttuvassa ilmastossa – poikkeuksellinen vuosi vai uusi normaali?		
Tiivistelmä <p>Kesällä 2018 paloi paljon metsää. Ruotsissa useat laaja-alaiset metsäpalot polttivat yhteensä lähemmäs 25 000 hehtaaria ja maa sai palojen sammuttamiseen apua ulkomaita myöten. Myös Suomessa metsäpalot pitivät palokunnat kiireisinä, kun kesän aikana maassa syttyi yli 2000 metsäpaloa, joissa metsää paloi yhteensä noin 1200 hehtaaria.</p> <p>Vaikean metsäpalokesän taustalla oli poikkeuksellisen lämmin ja kuiva sää. Tässä työssä arvioitiin kesän 2018 olosuhteiden harvinaisuutta Kanadassa kehitetyn metsäpaloriski-indeksin, ns. FWI-indeksin avulla. Tulosten mukaan suurella osalla Suomea ja Ruotsia yhtä suotuisat olosuhteet metsäpalojen esiintymiselle kuin kesällä 2018 toistuvat harvemmin kuin kerran 50 vuodessa. Ruotsissa kesä oli tässä suhteessa vielä hieman poikkeuksellisempi kuin Suomessa, missä metsäpaloriski oli vähintään yhtä suuri viimeksi kesällä 2006. Myös metsäpaloja Suomessa esiintyi kesällä 2006 enemmän kuin kesällä 2018. Sääolosuhteiden erot eivät kuitenkaan selitä sitä miksi Ruotsissa paloi metsää kesällä 2018 paljon enemmän kuin Suomessa. Viimeisten reilun 20 vuoden aikana metsäpaloja on esiintynyt maiden pinta-alan suhteutettuna Suomessa ja Ruotsissa suunnilleen yhtä paljon, mutta suuria metsäpaloja Ruotsissa on esiintynyt paljon enemmän kuin Suomessa. Yli 100 hehtaarin laajuisia metsäpaloja Ruotsissa on esiintynyt jopa noin kymmenen kertaa enemmän kuin Suomessa. Ruotsissa on ollut myös useampia yli 1000 hehtaarin metsäpaloja ja laajin yksittäinen palo kesällä 2014 poltti noin 14 000 hehtaaria metsää Västmanlandissa, kun samalla ajanjaksolla laajin metsäpalo Suomessa poltti vain noin 200 hehtaaria Tammelassa kesäkuussa 1997. Laaja-alaisen palojen tehokkaan torjunnan taustalla Suomessa arvioidaan olevan muun muassa haja-asutusalueiden aktiivisen vapaapalokuntatoiminnan.</p> <p>Ilmaston lämmetessä metsäpaloriskin arvioidaan kasvavan Suomessa ja muualla Pohjois-Euroopassa. Toistaiseksi tätä ei ole meillä voitu havaita kasvaneena paloalana. Tässä työssä ilmastonmuutoksen vaikutusta metsäpaloriskiin havainnollistettiin arvioimalla, kuinka usein Suomen tulevassa ilmastossa on sellaisia kesiä, jolloin metsäpaloriski on yhtä suuri tai suurempi kuin viime vuosien vaikeimpina metsäpalokesinä 2006 ja 2018. Eri ilmastonmuutosmallien simulaatioiden tulokset poikkeavat varsin paljonkin toisistaan, mutta näyttäisi kuitenkin siltä, että ainakaan ennen kuluva vuosisadan puoliväliä vuosien 2006 ja 2018 kaltaiset metsäpalokesät eivät mitenkään merkittävästi yleistyisi. Toisin sanoen vastaavan kaltaisia metsäpalokesiä esiintyisi edelleen enimmäkseen vain muutaman vuosikymmenen välein. Mikäli ilmaston lämpeneminen jatkuu voimakkaana tai jopa kiihtyy edelleen vuosisadan loppupuolella, voivat tällaiset vaikeat metsäpalokesät kuitenkin yleistyä niin paljon, että niitä esiintyisi ehkä vain muutaman vuoden välein.</p>		
Julkaisijayksikkö Sään ja ilmastonmuutoksen vaikutustutkimus		
Luokitus (UDK) 551.509.68, 551.577.38, 551.577.62, 630*430, 630*431		Asiasanat metsäpalot, ilmastonmuutos, Suomi
ISSN ja avainnimeke ISSN 0782-6079 Raportteja		
ISBN 978-952-336-108-9 (pdf)	Kieli suomi (tiivistelmä myös englanniksi)	Sivumäärä 26 + Liitteet

Publisher Finnish Meteorological Institute <i>Erik Palménin aukio 1</i> P.O. Box 503 00101 Helsinki, Finland		Report name and number Reports 2020:2
		Date May 2020
Authors Ilari Lehtonen and Ari Venäläinen		
Title Forest fire season 2018 in a changing climate – an exceptional year or new normal?		
Abstract <p>There occurred plenty of forest fires during the summer of 2018. In Sweden, a total of nearly 25,000 hectares of forest was burnt in several large-scale fires and firefighters from multiple countries were involved in fighting the fires. Also in Finland, the summer was busy for fire departments due to numerous forest fires. There occurred more than 2000 forest fires in Finland during the summer and approximately 1200 hectares of forest was burnt in the fires.</p> <p>The background reason for the difficult forest fire season was weather that was exceptionally warm and dry during the summer. In this work, fire weather conditions were evaluated based on the Fire Weather Index (FWI) system developed originally in Canada. We determined return levels for the Seasonal Severity Rating (SSR) describing the overall fire weather conditions during the fire season. It appeared that the return level for SSR in 2018 was more than 50 years widely in Finland and Sweden. In Sweden, the conditions were in many locations even slightly more exceptional than in Finland where the return levels for SSR were generally at least as high as in 2018 previously in 2006. Also, the number of forest fires and burned area were in Finland larger in 2006 than in 2018. However, differences in weather conditions could not explain why the burned area in Sweden was in 2018 so much larger than in Finland. During the last a couple of decades, the number of forest fires per land area has been rather similar in Finland and Sweden, but there has occurred a much higher number of large-scale fires in Sweden than in Finland. After the mid-1990s, there has been approximately even a ten times larger number of fires burning more than 100 hectares in Sweden than in Finland. During this time period, the largest forest fire occurred in Finland burned only 200 hectares of forest in Tammela in June 1997, while in Sweden several fires have burned even more than 1000 hectares of forest and the largest fire in 2014 burned approximately 14,000 hectares of forest in Västmanland. It is assumed that one reason for the effectiveness in suppressing fires in Finland before the fires have escalated into conflagrations is the active role of local volunteer fire departments in countryside.</p> <p>In the future, the forest-fire risk is expected to increase in Finland and elsewhere in Northern Europe due to global warming. However, so far, annual burned areas in Finland have not increased noticeably. In this work, the impact of climate change on forest-fire risk was illustrated by evaluating how often summers with similar or higher forest-fire risk as in 2006 and 2018 will occur in Finland in the future. The results obtained from simulations performed with different global climate models differ quite substantially. Nevertheless, forest fire seasons like in 2006 and 2018 will most likely remain rare at least until the mid-21st century. This would mean that the return levels for that kind of difficult forest fire seasons would still be order of several decades. However, in the late 21st century, difficult forest fire seasons comparable to 2006 and 2018 might occur even as often as every few years if the most pessimistic warming scenarios become realized.</p>		
Publishing unit Weather and Climate Change Impact Research		
Classification (UDK) 551.509.68, 551.577.38, 551.577.62, 630*430, 630*431		Keywords forest fires, climate change, Finland
ISSN and series title ISSN 0782-6079 Reports		
ISBN 978-952-336-108-9 (pdf)	Language Finnish (abstract also in English)	Pages 26 + Appendix

## Sisällysluettelo

1 Johdanto	6
2 Aineisto ja menetelmät	7
2.1 Sääaineisto	7
2.2 Ilmastomalliaineistot	7
2.3 Metsäpaloriski-indeksin laskenta	10
3 Tulokset	12
3.1 Kesän 2018 metsäpalot	12
3.2. Metsäpaloriskin toistuvuustasot ja toistuvuusajat jaksolla 1979–2019	15
3.3 Ilmastomuutoksen vaikutus korkean metsäpaloriskin toistuvuusaikoihin	19
4 Yhteenveto ja johtopäätökset	22
Kiitokset	23
Kirjallisuusluettelo	23
Liitteet	27

# 1 Johdanto

Metsäpalot nousivat Suomessakin voimakkaasti esille julkisessa keskustelussa kesällä 2018, jolloin Ruotsissa paloi lukuisissa suurissa paloissa yhteensä noin 25 000 hehtaaria metsää (Statens offentliga utredningar, 2019; Sjöström ja Granström, 2020). Myös Suomessa kesä 2018 oli maastopalojen näkökulmasta pelastuslaitoksille erittäin työläs. Vuoden aikana maassamme syttyi yli 4000 maastopaloa. Nämä palot polttivat noin 1200 hehtaaria metsää ja vajaat 400 hehtaaria muuta maastoa (Ketola, 2018). Laajin yksittäinen palo tuhosi noin 80 hehtaaria metsää Pyhärannassa Varsinais-Suomessa ja aiheutti yli 400 000 euron omaisuusvahingot. Kesän 2018 maastopalojen keskikoko oli kuitenkin Suomessa vain alle hehtaarin ja yli 80 % kaikista paloista jäi alle puolen hehtaarin laajuisiksi (Ketola, 2018).

Myös kesän 2018 jälkeen metsäpalot ovat pysyneet uutisotsikoissa. Seuraavana vuonna laajoja metsäpaloja oli muun muassa Siperiassa ja Amazonin sademetsissä. Australiassa puolestaan maastopalokausi 2019–2020 oli poikkeuksellisen vaikea ja etenkin maan kaakkoisosassa Uuden Etelä-Walesin ja Victorian osavaltioissa palot roihusivat ennennäkemättömän laajoina (Lehtonen, 2020). Samaan aikaan ilmastomuutos on noussut julkisessa keskustelussa entistä näkyvämmäksi teemaksi sen jälkeen, kun Hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) vuonna 2018 julkaisi niin sanotun 1,5 asteen raportin (IPCC, 2018). Missä tahansa laajoja metsäpaloja onkaan viime vuosina roihunut, on esiin noussut kysymys siitä ovatko juuri kyseiset palot ilmentäneet ilmastomuutoksen vaikutusta ja olleet esimakua siitä millaisia ääri-ilmiöitä ilmastomuutos tulevaisuudessa tuo tullessaan. Metsillä on myös tärkeä rooli pyrittäessä hillitsemään ilmaston lämpenemistä, sillä ne sitovat hiilidioksidia ilmakehästä ja toimivat hiilen varastoina. Metsäpaloissa metsiin varastoitunut hiili vapautuu hetkessä ilmakehään ja metsäpaloissa vapautuvan hiilen määrän on Pohjois-Euroopassa arvioitu voivan kaksinkertaistua kuluvan vuosisadan aikana (Migliavacca et al., 2013). Palojen seurauksena metsistä voi tulla jopa hiilen lähteitä (Walker et al., 2019). Toisaalta luonnon monimuotoisuuden suojelemisen näkökulmasta metsää palaa Suomessa nykyään auttamattoman vähän (Parviainen, 1996; Virkkala ja Toivonen, 1999).

Suomessa kesän 2018 metsäpalojen leviämisestä Pelastusopisto laati tuoreeltaan tilastollisen selvityksen saman vuoden syksyllä (Ketola, 2018). Erityisesti tavoitteena oli selvittää, miksi metsäpalot jäivät meillä paljon pienialaisemmiksi kuin Ruotsissa. Selvityksessä palojen mahdollisimman varhainen havainnointi ja maamme tiheä metsäautotieverkosto todettiin metsäpalojen torjunnassa ensiarvoisen tärkeiksi. Laajimmalle levinneet palot tapahtuivat syrjäisten alueiden laajoilla yhtenäisillä metsäalueilla ja niille oli tyypillistä, että ne havaittiin ensin epä-määräisinä savuhavaintoina ja tarkan palopaikan etsimisessä kului siksi aikaa. Lisäksi nämä palot olivat yleensä kaukana asutuksesta sekä lähimmistä vesilähteistä ja paloautolla ajettavista teistä. Suurehkoja yli viiden hehtaarin paloja sattui Suomessa kesällä 2018 eniten Lapissa, vaikka lukumääräisesti metsäpaloja oli eniten Uudellamaalla. Ruotsissa uusin tietämys metsä- ja ruohikkopalojen esiintymisestä viime vuosikymmeninä on puolestaan koottu Sjöbergin ja Granströmin (2020) raporttiin.

Ilmastomuutoksen vaikutuksesta metsäpalariskiin niin Suomessa (Kilpeläinen et al., 2010; Mäkelä et al., 2014; Lehtonen et al., 2014, 2016; Venäläinen et al., 2016) kuin muuallakin boreaalisella alueella (mm. Flannigan et al., 2009; Wotton et al., 2010; de Groot et al., 2013; Shvidenko ja Schepaschenko, 2013; Sherstyukov ja Sherstyukov, 2014; Yang et al., 2015) on julkaistu viime vuosina useita tutkimuksia. Yhteistä näiden tutkimusten tuloksille on metsäpalariskin kasvaminen ilmaston lämmetessä, joskin muutoksen suuruuteen liittyy tutkimusten mukaan suurta epävarmuutta. Ilmaston lämpenemisen seurauksena kasvava metsäpalariski onkin noteerattu muun muassa Suomen kansallisessa riskiarviossa (Sisäministeriö, 2019).

Pohjois-Euroopassa kesä 2018 oli monin paikoin ennätyksellisen lämmin, mutta vuosisadan lopulla yhtä lämpimien kesien ennakoitaan olevan yleisiä (Lehtonen ja Pirinen, 2019a).

Kesän olosuhteiden ollessa vielä tuoreessa muistissa mielenkiintoinen kysymys onkin, tulevatko myös yhtä vaikeat metsäpalokesät olemaan tulevaisuudessa yleisiä. Tämän selvittämiseksi ja kesän 2018 olosuhteiden laittamiseksi perspektiiviin laskettiin ensin kesän 2018 metsäpaloriskin toistuvuusaika nykyisessä ilmastossa, jonka jälkeen vastaavien olosuhteiden toistuvuusaikaa arvioitiin tulevaisuuden ilmastossa ilmastomallien tulosten perusteella.

## 2 Aineisto ja menetelmät

Metsäpaloriskin arvioimisessa on tässä työssä käytetty Kanadassa kehitettyä metsäpaloriski-indeksiä, niin sanottua FWI-indeksiä (Fire Weather Index; Van Wagner, 1987). Jakson 1979–2019 sääolosuhteista Pohjois-Euroopan alueella on saatu tietoa Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskuksen (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; ECMWF) ERA5-uusanalyysistä (Hersbach ja Dee, 2016). Ilmastomuutoksen vaikutus on arvioitu Lehtosen et al. (2016) aiemmassa työssä käyttämien ilmastomallien tulosten pohjalta. Edellä mainituista aineistoista ja menetelmistä kerrotaan tarkemmin seuraavissa alaluvuissa.

Lisäksi tiedot vuosien 1996–2019 maastopaloista Suomessa saatiin käyttöön Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilastot sisältävästä PRONTO-tietokannasta.

### 2.1 Sääaineisto

Metsäpaloriskin laskennassa käytetyt tiedot sääolosuhteista perustuvat ECMWF:n ERA5-uusanalyysiin (Hersbach ja Dee, 2016), joka ulottuu tällä hetkellä nykyhetkestä menneisyydessä vuoteen 1979 asti. Ilmakehän uusanalyysillä voidaan muodostaa kolmiulotteinen kuva ilmakehän tilasta menneessä ajassa. Uusanalyysissä kuva ilmakehän tilasta muodostetaan jälkikäteen nykyaikaisilla ilmakehämalleilla yhdistämällä mallien ennusteet ja saatavilla olevat pintasään havainnot sekä tiedot ylemmästä ilmakehästä, kuten yläilmakehän luotaus- ja satelliittihavainnot (mm. Parker, 2016).

ERA5-uusanalyysiaineistossa sääsuureiden arvot esitetään hilaruudukossa, jossa yhden hilaruudun sivun pituus on  $0.25^\circ$ . Tätä työtä varten ERA5-uusanalyysistä ladattiin tunnitaiset tiedot ilman lämpötilasta ja kastepistelämpötilasta kahden metrin korkeudella, tuulen suunta-komponentit kymmenen metrin korkeudelta sekä sademäärä vuosilta 1979–2019.

### 2.2 Ilmastomalliaineistot

Ilmastomuutoksen vaikutuksen arvioimisessa käytettiin Lehtosen et al. (2016) työssä käytettyjä aineistoja. Ilmastomuutosarviot perustuivat viiden Taulukossa 1 luetellun maailmanlaajuisen ilmastomallin tuloksiin. Kyseiset mallit kuuluvat ilmastomallien CMIP5-malliperheeseen (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5; Taylor et al., 2012).

**Taulukko 1.** Tutkimuksessa käytetyt ilmastomuutosmallit.

Malli	Alkuperämaa	Erottelukyky	Viite
CanESM2	Kanada	$1,875^\circ \times 1,875^\circ$	von Salzen et al. (2013)
CNRM-CM5	Ranska	$1,4^\circ \times 1,4^\circ$	Voldoire et al. (2013)
GFDL-CM3	Yhdysvallat	$2,5^\circ \times 2,0^\circ$	Donner et al. (2011)
HadGEM2-ES	Iso-Britannia	$1,25^\circ \times 1,875^\circ$	Collins et al. (2011)
MIROC5	Japani	$1,4^\circ \times 1,4^\circ$	Watanabe et al. (2010)

Metsäpalariski-indeksin laskentaa varten malleista oli käytössä päivittäiset tiedot ilman lämpötilasta, sademäärästä, tuulen nopeudesta ja suhteellisesta kosteudesta vuosilta 1980–2009. Mallien tulokset jaksolta 1980–2005 perustuivat niin sanottuihin historiallisiin simulaatioihin, kun taas vuodesta 2006 eteenpäin käytössä olivat kasvihuonekaasujen RCP-päästöskenaarioihin (Representative Concentration Pathway) RCP4.5 ja RCP8.5 pohjautuvien malliajajen tulokset (van Vuuren et al., 2011). Näistä skenaariosta RCP4.5 edellyttäisi ilmastopolitiikan osittaista onnistumista. Tässä skenaariossa maailmanlaajuiset hiilidioksidipäästöt kasvavat vielä aluksi hieman, mutta kääntyvät laskuun vuoden 2040 tienoilla ja kasvihuonekaasujen pitoisuudet ilmakehässä alkavat vakiintua vuosisadan loppupuolella, jolloin ilmakehän hiilidioksidipitoisuus olisi noin kaksinkertainen esiteolliseen aikaan verrattuna. Maailmanlaajuisesti tämä johtaisi selvästi voimakkaampaan lämpenemiseen kuin mihin suuri osa maailman valtioista on sitoutunut Pariisin ilmastositoumuksessa. Vielä selvästi voimakkaampaan lämpenemiseen johtaa RCP8.5-skenaario, joka kuvastaa täydellistä epäonnistumista pyrkimyksissä kasvihuonekaasujen päästöjen rajoittamisessa.

Lehtosen et al. (2016) työssä mallitulokset interpoloitiin Suomen kattavaan  $0,1^\circ \times 0,2^\circ$  (noin  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ ) hilaruudukkoon kvantiilikorjaukseksi kutsutulla harhankorjausmenetelmällä (Räisänen ja Rätty, 2013; Rätty et al., 2014). Jakson 1981–2010 havaittua ilmastoa käytettiin vertailujaksone, johon mallituloksia verrattiin kussakin  $0,1^\circ \times 0,2^\circ$  hilaruudussa. Kvanttiilikorjauksessa sääsuureiden mallinnettuja arvoja muutettiin siten, että kunkin suureen arvojen mallinnettu jakauma vertailujaksolla kuukausittain vastasi muunnoksen jälkeen suureen havaittua jakaumaa. Vastaava korjaus suoritettiin koko jaksolle 1980–2009. Ilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja sademäärän arvot Suomen kattavassa hilaruudukossa oli ensin tuotettu Ilmatieteen laitoksen asemahavainnoista kriging-interpoloinnilla (Aalto et al., 2016). Tuulen nopeuden osalta havaintoaineistona käytettiin ERA-Interim-uusanalyysistä  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$  asteen hilassa saatuja arvoja (Dee et al., 2011), jotka bilineaarisesti interpoloitiin  $0,1^\circ \times 0,2^\circ$  hilaan.

Taulukossa 2 on esitetty malli kerrallaan metsäpalariski-indeksin laskennan kannalta oleellisten sääsuureiden arvoja Suomen aluekeskiarvoina touko-syyskuussa 40-vuotisjaksoilla 1980–2019, 2020–2059 ja 2060–2099. Kahden ensimmäisen 40-vuotisjakson välillä mallit ennustavat keskimäärin ilman lämpötilan nousevan noin parilla asteella lämpenemisen ollessa hieman voimakkaampaa RCP8.5- kuin RCP4.5-skenaariossa. Vuosisadan lopulla lämpeneminen on sen sijaan selvästi voimakkaampaa RCP8.5-skenaariossa, keskimäärin noin viisi astetta jaksoon 1980–2019 verrattuna, kun RCP4.5-skenaariossa se on vastaavasti noin kolme astetta. Yksittäisistä malleista lämpeneminen on voimakkainta GFDL-CM3-mallissa ja myös HadGEM2-ES-malli tuottaa mallien keskiarvoa suuremman lämpenemisen. Vähäisintä lämpeneminen on CNRM-CM5-mallissa.

Ilman suhteellinen kosteus pienenee kaikkien mallien tulosten mukaan jonkin verran kesäpuolella vuotta, joskin osassa malleista simuloitu muutos on hyvin pieni. Keskimäärin muutos on hieman suurempi RCP8.5- kuin RCP4.5-skenaariossa ja suurimman muutoksen tuottaa HadGEM2-ES-malli.

Sademäärän ennustetaan touko-syyskuussa kasvavan molemmissa RCP-skenaarioissa karkeasti noin kymmenen prosenttia kahden ensimmäisen 40-vuotisjakson välillä. Kahden viimeisen jakson välillä sademäärän ei ennusteta muuttuvan enää paljoakaan. Mallista riippuen ennustettu muutos vaihtelee noin 0 ja 20 % välillä. Talvella sademäärän ennustetaan kasvavan selvästi enemmän ja yleisesti ottaen muutos on myös suurempi Pohjois- kuin Etelä-Suomessa.

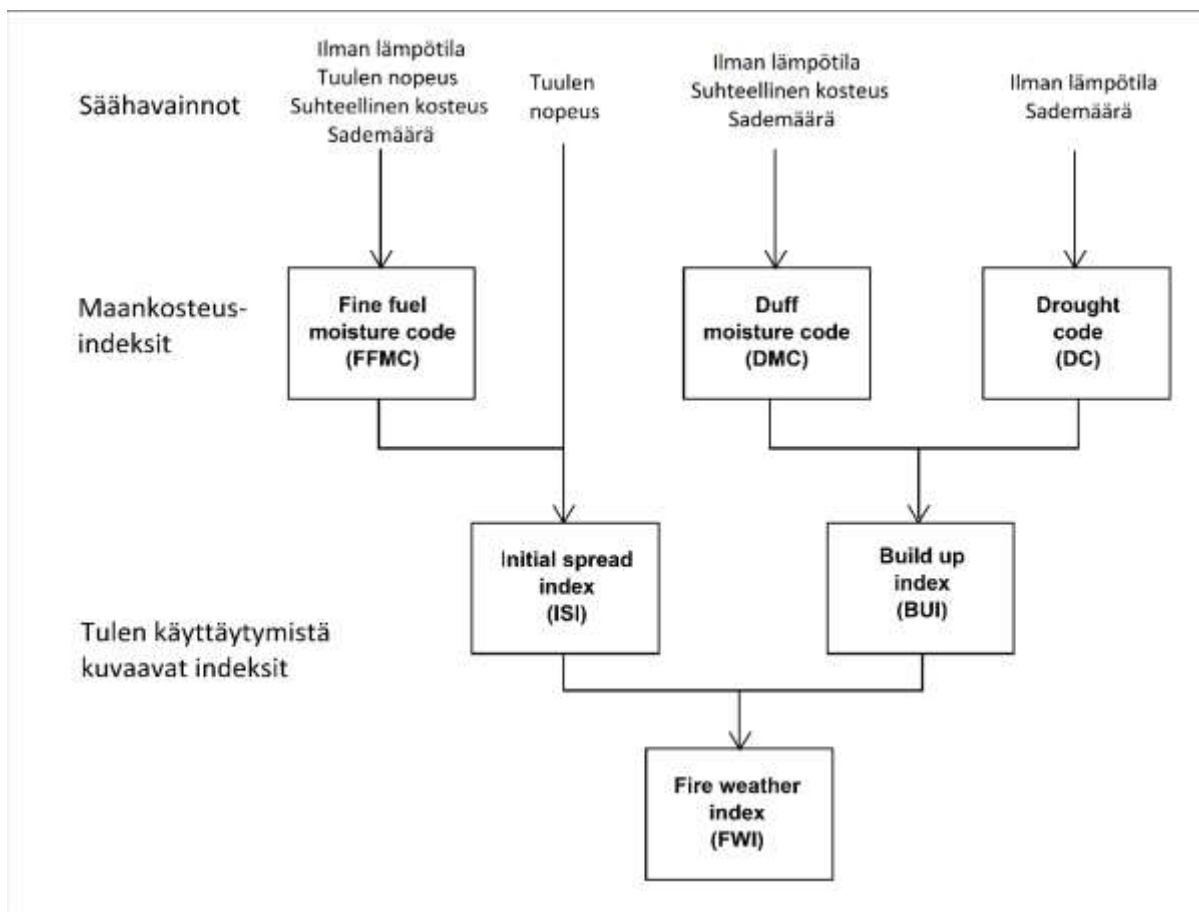
Keskimääräiset tuulet voimistuvat jonkin verran GFDL-CM3-mallissa, mutta muut mallit ennakoivat tuulen nopeuksien säilyvän kutakuinkin muuttumattomina. Myöskään mallien keskiarvona tuulen nopeudet eivät näyttäisi muuttuvaan suuntaan taikka toiseen. Tuulen nopeuksien säilyminen Pohjois-Euroopassa likimain ennallaan on keskimääräinen tulos myös tarkastellessa laajempaa joukkoa CMIP5-malleja (Ruosteenoja et al., 2019).

**Taulukko 2.** Ilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden, sademäärän ja tuulen nopeuden koko Suomen yli lasketut keskiarvot touko-syyskuussa jaksoilla 1980–2019, 2020–2059 ja 2060–2099 käytössä olleissa Suomen kattavaan  $0,1^\circ \times 0,2^\circ$  hilaan interpoloiduissa ja harhasta korjatuissa ilmastomuutosmalliaineistoissa RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioissa.

	CanESM2	CNRM-CM5	GFDL-CM3	Had-GEM2-ES	MIROC5	Mallien keskiarvo
<b>Ilman lämpötila 2 metrin korkeudella (°C)</b>						
<u><b>RCP4.5</b></u>						
1980–2019	11,6	11,6	11,6	11,8	11,7	11,7
2020–2059	13,3	12,7	14,8	13,7	13,0	13,5
2060–2099	14,2	13,8	16,5	15,2	13,9	14,7
<u><b>RCP8.5</b></u>						
1980–2019	11,7	11,6	11,9	11,6	11,6	11,7
2020–2059	13,7	12,9	15,4	14,1	13,4	13,9
2060–2099	16,4	14,7	18,6	17,3	16,5	16,7
<b>Ilman suhteellinen kosteus 2 metrin korkeudella (%)</b>						
<u><b>RCP4.5</b></u>						
1980–2019	75,0	74,7	75,6	74,9	74,2	74,9
2020–2059	74,2	74,8	73,7	72,7	73,1	73,7
2060–2099	73,8	72,6	73,5	72,1	72,2	72,8
<u><b>RCP8.5</b></u>						
1980–2019	75,2	74,7	75,7	75,0	74,0	74,9
2020–2059	73,4	74,6	72,8	72,6	73,0	73,3
2060–2099	71,0	74,6	72,6	68,7	70,9	71,5
<b>Sademäärä (mm)</b>						
<u><b>RCP4.5</b></u>						
1980–2019	271	269	265	268	273	269
2020–2059	295	312	306	280	305	300
2060–2099	314	293	329	283	313	307
<u><b>RCP8.5</b></u>						
1980–2019	270	266	264	268	271	268
2020–2059	287	299	312	289	294	296
2060–2099	298	322	336	263	314	306
<b>Tuulen nopeus 10 metrin korkeudella (m/s)</b>						
<u><b>RCP4.5</b></u>						
1980–2019	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
2020–2059	3,4	3,4	3,4	3,4	3,5	3,4
2060–2099	3,3	3,4	3,6	3,3	3,5	3,4
<u><b>RCP8.5</b></u>						
1980–2019	3,4	3,4	3,5	3,4	3,4	3,4
2020–2059	3,3	3,4	3,8	3,4	3,5	3,5
2060–2099	3,3	3,4	3,9	3,2	3,3	3,4

## 2.3 Metsäpaloriski-indeksin laskenta

Metsäpaloriskin arvioimisessa käytettiin kanadalaista FWI-indeksiä (Van Wagner ja Pickett, 1985; Van Wagner, 1987), joka on kansainvälisesti yksi käytetyimmistä indekseistä metsäpaloriskin kuvaamisessa. Indeksien laskennassa käytetään ilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja tuulen nopeuden iltapäiväarvoja sekä vuorokauden sadesummaa, joiden perusteella lasketaan jokaiselle päivälle kolme maankosteusindeksiä ja edelleen kaksi tulen käyttäytymistä kuvaavaa indeksiä, joista lopuksi johdetaan FWI-indeksin lopullinen päiväkohtainen arvo. FWI-indeksin arvo pyrkii kuvaamaan palon todennäköistä voimakkuutta, mikäli metsäpalo syttyy kyseisenä päivänä. Indeksien laskentakaaviota on havainnollistettu kuvassa 1.



**Kuva 1.** FWI-indeksin skemaattinen laskentakaavio.

Kolmesta maankosteusindeksistä ensimmäinen, ”fine fuel moisture code” (FFMC) kuvaa pintakarikkeen kosteutta ja reagoi nopeasti sääolosuhteisiin. Sen arvoon vaikuttavat kaikki sääsuureet. Seuraava maankosteusindeksi, ”duff moisture code” (DMC) kuvaa maan pintakerroksen kosteutta muutaman sentin syvyyteen asti ja siihen vaikuttavat ilman lämpötila, suhteellinen kosteus sekä sademäärä. Syvemmän maan kosteutta kuvaa ”drought code” (DC), joka reagoi sääolosuhteisiin kaikkein hitaimmin ja siihen vaikuttavat ainoastaan ilman lämpötila ja sademäärä. Kaksi viimeistä indeksiä yhdistyvät maaston yleistä syttymisherkkyyttä kuvaavassa indeksissä ”build-up index” (BUI), jossa DMC:n vaikutus yleensä painottuu, mutta suurilla DMC:n arvoilla, eli hyvin kuivissa tilanteissa, myös syvemmän maan kuivuus eli DC:n vaikutus korostuu. Kaikki FWI-indeksijärjestelmän maankosteusindeksit ovat pikemminkin kuivuusindeksejä, koska mitä kuivempaa maaperä on, sitä suuremmilla indeksin arvoilla maan kosteutta kuvataan. BUI:n lisäksi kyseisen päivän paloriskin suuruutta kuvaavan FWI-indeksin



lopulliseen arvoon vaikuttaa palon odotettua leviämisenopeutta kuvaava ”initial spread index” (ISI), johon vaikuttavat pintakarikkeen kosteus ja tuulen nopeus.

FWI-indeksi voidaan edelleen muuntaa palojen sammuttamisen vaikeutta paremmin kuvaavaksi suureeksi ”daily severity rating” (DSR) kaavalla:

$$DSR = 0.0272 \times FWI^{1.77} \quad (1)$$

DSR painottaa potenssifunktion avulla enemmän FWI-indeksin suuria arvoja. Keskiarvoistamalla DSR jonkin ajanjakson yli, saadaan kyseisen ajanjakson keskimääräistä paloriskiä kuvaava indeksi, ”seasonal severity rating” (SSR). Kuukauden jaksolle keskiarvoistetusta DSR:stä käytetään nimitystä ”monthly severity rating” (MSR).

Tässä tutkimuksessa laskettiin ensin päivittäiset FWI-indeksin arvot ERA5-uusanalyysiaineistosta  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  hilaruudukossa Pohjois-Euroopan alueella 41 vuoden jaksolla 1979–2019. Laskennassa käytettiin ilman lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja tuulen nopeuden arvoja kunakin päivänä ajanhetkeltä 12 UTC sekä edeltävien 24 tunnin sadekertymää. Näistä päivittäisistä FWI-indeksin arvoista laskettiin sitten kuukausittaiset MSR:n arvot vuosittain toukokuulta syyskuulle sekä koko metsäpalokautta kuvaava SSR:n arvo keskiarvoistamalla DSR:n arvot touko-syyskuun jaksolle. Tämän jälkeen vuosittaisille SSR:n arvoille sekä kunkin kuukauden MSR:n arvoille määritettiin ääriarvoanalyysin mukaiset toistuvuustasot käyttäen GEV-ääriarvojakaumaa (Gilleland et al., 2005; Katz et al., 2005). Toistuvuustasojen avulla pystyttiin puolestaan määrittelemään vuosittaisten SSR:n ja MSR:n arvojen toistuvuusajat. Koska toistuvuusajat määriteltiin 41 vuoden aineiston perusteella, on syytä huomata, että etenkin tätä pidempiin toistuvuusajoihin sisältyy suurta epävarmuutta; yksi yksittäinen kuiva vuosi aineistossa voi vaikuttaa huomattavasti määriteltäviin toistuvuustasoihin jakauman ääripäässä.

Ilmastonmuutoksen vaikutuksen arvioimisessa metsäpaloriskin toistuvuusajoihin käytettiin Lehtosen et al. (2016) aiemmin Suomen alueelle  $0,1^\circ \times 0,2^\circ$  hilassa jaksolle 1980–2099 laskemia FWI-indeksin arvoja. Nämä laskelmat perustuivat alaluvussa 2.2 kuvattuihin ilmastomalliaineistoihin. Koska FWI-indeksin laskennassa on tarkoitus käyttää sääsuureiden iltapäivän havaintoarvoja, käytettiin tässä yhteydessä ilman lämpötilan vuorokauden ylimpiä arvoja, jotka olivat aineistossa käytettävissä vuorokauden keskilämpötilojen lisäksi. Sen sijaan suhteellisesta kosteudesta ja tuulen nopeudesta aineistossa olivat vain vuorokausikeskiarvot. Suhteellisen kosteuden vuorokausiarvot muunnettiin vastaamaan iltapäivän olosuhteita olettamalla absoluuttinen kosteus kunakin vuorokautena vakioksi. Mikäli tämä johti yöaikaiseen ylikyllästystilaan vuorokauden alimman lämpötilan suhteen, siirrettiin kuitenkin vastaava määrä kosteutta iltapäivälle. Tuulen nopeuden vuorokausikeskiarvot puolestaan kerrottiin vakiolla 1,2, koska iltapäivällä tuulet ovat kesäpuolella vuotta keskimäärin parikymmentä prosenttia voimakkaampia kuin keskimäärin koko vuorokauden aikana.

Lehtosen et al. (2016) laskemista päivittäisistä FWI-indeksin arvoista määritettiin MSR:n ja SSR:n arvot touko-syyskuulle vastaavasti kuin ERA5-uusanalyysiaineistosta. Tämän jälkeen näille määritettiin toistuvuustasot ja toistuvuusajat vastaavalla tavalla kolmelle 40-vuotisjaksolle 1980–2019, 2020–2059 ja 2060–2099. Nämä määritettiin erikseen kaikkien viiden ilmastomallin simulaatioista lasketuille metsäpaloriski-indekseille RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioissa. ERA5-uusanalyysiaineistosta valittiin toistuvuusajataarkastelun ja toteutuneiden palolojen perusteella korkean metsäpaloriskin vuodet 2006 ja 2018, joita vastaaville paloriskin toistuvuusajoille tuotettiin Suomen alueelle arviot tulevaisuuden ilmastossa jaksoilla 2020–2059 ja 2060–2099. Ensin näiden kahden vuoden metsäpaloriskin toistuvuusajat jaksolta 1979–2019 interpoloitiin bilineaarisesti ERA5-uusanalyysiaineiston  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  hilasta Suomen kattavaan  $0,1^\circ \times 0,2^\circ$  hilaan ja malliaineistoista määriteltujen toistuvuusajojen perusteella haettiin jaksolta 1980–2019 näitä toistuvuusajoihin vastaavat toistuvuustasot. Tämän

jälkeen haettiin tätä toistuvuustasoa vastaavat toistuvuusajat tulevaisuuden jaksoilta 2020–2059 ja 2060–2099, erikseen kullekin mallille ja molemmille RCP-skenaarioille. Näin saatiin muodostettua arviot siitä, kuinka usein kesien 2006 ja 2018 olosuhteita vastaava metsäpalariski ilmastomallitulosten perusteella toistuisi tulevaisuudessa.

### 3 Tulokset

#### 3.1 Kesän 2018 metsäpalot

Viimeisten reilun 20 vuoden aikana maastopalojen vuosittainen lukumäärä Suomessa on vaihdellut noin 1000 ja 6000 palon välillä (kuva 2). Näistä paloista vajaa puolet on ollut metsäpaloja, kun metsäpaloiksi lasketaan ne palot, joissa palaneeksi maastotyyppiä on kirjattu joko metsäalue, hakkuuaukea tai muu suoalue kuin turvetuotantoalue. Pinta-alan mukaan tarkasteltuna metsäpaloissa on kuitenkin palanut hieman yli puolet kaikista maastopaloissa palaneesta alueesta.

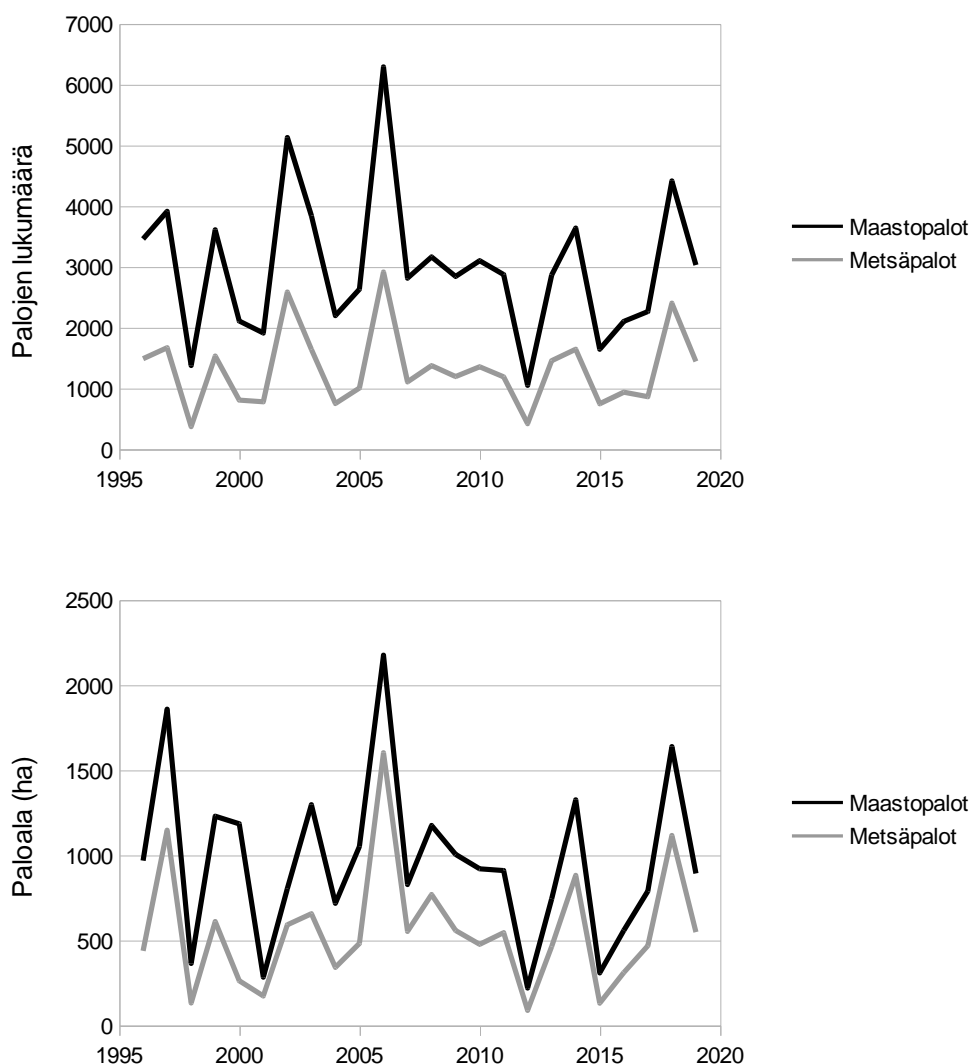
Kesällä 2018 metsäpaloja, kuten maastopaloja yleensäkin, esiintyi Suomessa selvästi tavanomaista enemmän. Mitenkään ennätysellinen vuosi ei kuitenkaan ollut. 1990-luvun puolivälin jälkeen vaikein metsäpalokesä niin palojen lukumäärän kuin palaneen alueen pinta-alan mukaan tarkasteltuna oli kesä 2006. Lukumääräisesti toiseksi eniten paloja oli kesällä 2002 ja kolmanneksi eniten kesällä 2018. Myös palojen kokonaispinta-alassa kesä 2018 sijoittuu kolmannelle sijalle. Toiseksi eniten maastoa paloi vuoden 1997 paloissa.

Ruotsissa maastopalojen vuosittainen määrä on 1990-luvun puolivälin jälkeen vaihdellut hyvin samankaltaisesti kuin Suomessa. Maassa on todettu vuosittain noin 1000–4500 metsäpaloa ja lisäksi saman verran avoimien alueiden ruohikkopaloja (Sjöström ja Granström, 2020). Palojen kokonaismäärä on siis ollut Ruotsissa hieman suurempi kuin Suomessa, mikä voidaan selittää Ruotsin Suomea suuremmalla pinta-alalla ja väkiluvulla. Useimpina vuosina myös maastopaloissa palanut pinta-ala on ollut Ruotsissa suunnilleen samaa suuruusluokkaa kuin Suomessa, mutta muutamina yksittäisinä vuosina metsää on palanut Ruotsissa selvästi enemmän. Vuosina 1997, 2006 ja 2008 metsäpalot polttivat Ruotsissa kunakin vuonna hieman yli 5000 hehtaaria ja vuonna 2014 peräti noin 15 000 hehtaaria. Kesän 2018 paloissa metsää paloi jo lähemmäs 25 000 hehtaaria (Sjöström ja Granström, 2020). Myös lukumääräisesti metsäpaloja oli Ruotsissa vuonna 2018 enemmän kuin yhtenäkkään toisena vuotena 1990-luvun puolivälin jälkeen. Sen sijaan ruohikkopalojen lukumäärässä vuodet 1997 ja 2003 jäivät kesän 2018 edelle.

Vuoden 2014 suuren paloalan Ruotsissa selittää Västmanlandin suurpalo, joka yksinään poltti noin 14 000 hehtaaria metsää (Västmanland County Administrative Board, 2015). Kesän 2018 paloala sen sijaan aiheutui useammista suurista paloista. Kaiken kaikkiaan Ruotsissa todettiin vuosina 1996–2018 hieman yli 50 yli 100 hehtaarin metsäpaloa ja vajaat kymmenen yli 1000 hehtaarin metsäpaloa (Sjöström ja Granström, 2020). Vastaavana aikana Suomessa suurin yksittäinen metsäpalo poltti 200 hehtaaria metsää Tammelassa kesäkuussa 1997. Loputkin yli 100 hehtaarin metsäpalot Suomessa viime vuosilta on nopeasti lueteltu: Kangasalassa paloi 110 hehtaaria metsää syyskuussa 1999, Nummi-Pusulassa paloi niin ikään 110 hehtaaria metsää toukokuussa 2007 sekä Hangossa paloi 100 hehtaaria metsää ja suota heinäkuussa 2017. Lisäksi ennen kaikkea turvetuotantoalueilla on sattunut muutamia suuria paloja. Toukokuussa 2000 Halsualla paloi turvesuota peräti 800 hehtaaria.

Verrattaessa kesää 2018 muihin vuosiin 1990-luvun puolivälin jälkeen, voidaan kesän todeta Ruotsissa olleen selvästi vaikein metsäpalokesä. Myös Suomessa kesä 2018 oli selvästi keskimääräistä aktiivisempi metsäpalokesä, mutta ei kuitenkaan kesän 2006 veroinen. Haettaessa vertailukohtaa kauempaa historiasta, voidaan laajoja metsäpaloja todeta esiintyneen Suo-

messakin vielä 1900-luvun alkupuolella ja etenkin 1800-luvulla, jolloin esimerkiksi kesällä 1868 pelkästään valtionmetsää paloi Suomessa yli 60 000 hehtaaria (Saari, 1923; Osara, 1949). Viimeisin todellinen suurpalo Suomessa sattui kesällä 1960, jolloin Itä-Lapissa Sallan Tunt-sassa metsää ja kitukasvuista tunturipaljakkaa paloi itärajan pinnassa 20 000 hehtaaria (Haataja, 1993). Samassa palossa maastoa paloi rajan takana Venäjällä vielä 100 000 hehtaaria lisää. Venäjällä suuret palot ovat edelleen yleisiä ja Venäjän viime aikojen pahimpana metsäpalo-vuotena, kesällä 2010, pelkästään Venäjän Euroopan puoleisissa osissa metsää paloi jopa yli kaksi miljoonaa hehtaaria (Bondur, 2011).

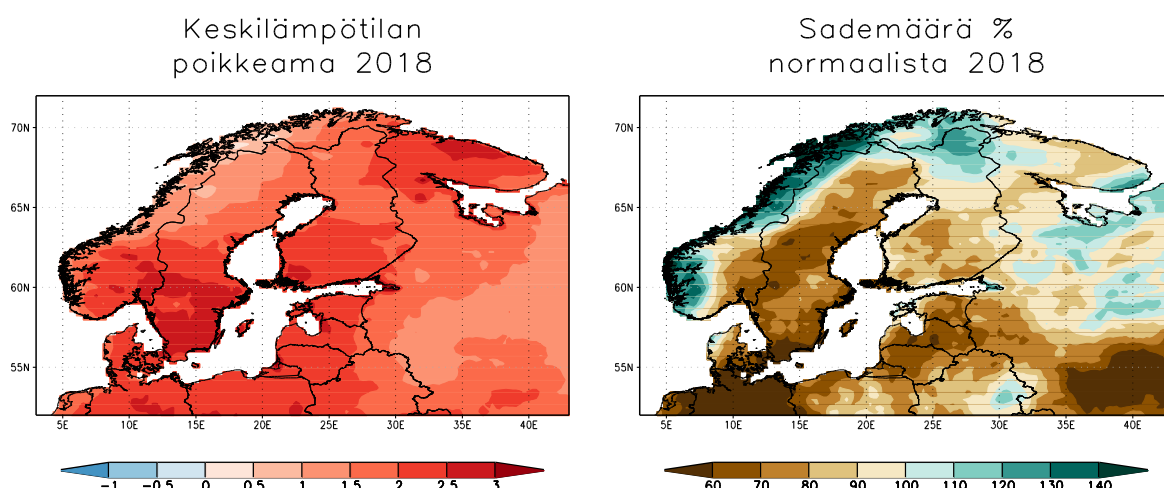


**Kuva 2.** Maastopalojen vuosittainen lukumäärä (ylh.) ja maastopaloissa palanut pinta-ala (alh.) Suomessa vuosina 1996–2019. Metsäpalojen osuus kaikista maastopaloista on esitetty harmaalla käyrällä. Metsäpaloiksi on laskettu maastopalot, joissa paloalueen maastotyyppiä on määriteltä joko metsä, hakkuuaukea tai muu suoalue kuin turvetuotantoalue.

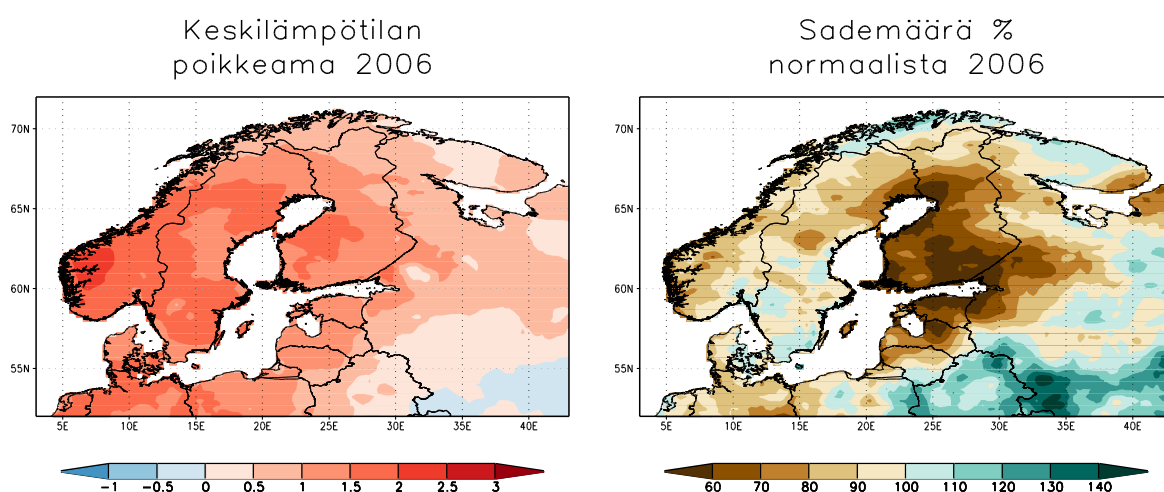
Sääoloiltaan kesä 2018 oli poikkeuksellisen lämmin ja monin paikoin erittäin kuiva. Kesän lämpimyyttä kuvausta kasvukauden lämpösumma kohosi Suomessa Lappia lukuun ottamatta ennätysellisen suureksi (Lehtonen ja Pirinen, 2019a). Erityisesti alkukesällä kärsittiin myös poikkeuksellisesta kuivuudesta, etenkin maan etelä- ja länsiosissa (Lehtonen ja Pirinen, 2019b). Toukokuu oli erittäin kuiva ja lisäksi ennätysellisen lämmin lähes koko maassa. Kesäkuu oli lämpöoloiltaan melko tavanomainen, mutta Etelä- ja Länsi-Suomessa kuivuus jatkui

alkukuusta. Heinäkuu oli jälleen erittäin kuuma, Satakunnassa, Pohjanmaan maakunnissa sekä Lapissa mittaushistorian lämpimin. Etelä- ja Kaakkois-Suomessa satoi jonkin verran runsaammin heinäkuun alussa, mutta muuten heinäkuukin oli pääsääntöisesti erittäin kuiva. Rankkojakin ukkoskuuroja kuitenkin esiintyi paikoin. Elo-syyskuussakin sää jatkui edelleen selvästi tavanomaista lämpimämpänä, mutta kuivuus alkoi vähitellen hellittää. Lapissa satoi elokuussa paikoin erittäin runsaasti ja syyskuu oli tavanomaista sateisempi suuressa osassa maata. Niinpä metsäpalojen kannalta aktiivisimpien kuukausien (touko-syyskuu) yhteenlaskettua sademäärää tarkasteltaessa Keski- ja Pohjois-Lapissa satoi jopa keskimääräistä enemmän, kun taas Etelä- ja Keski-Suomessa kesä oli selvästi tavanomaista vähäsateisempi (kuva 3). Touko-syyskuun keskilämpötila oli kautta maan noin pari astetta tavanomaista korkeampi (kuva 3). Suurin poikkeama normaalista oli Lounais-Suomessa. Ruotsissa kesä oli tavanomaiseen verrattuna vielä kuivempi kuin Suomessa ja myös laajalti ennätyskellisen lämmin.

Suomessa kuivin kesä yli 100 vuoteen oli laajalti vuonna 2006, joka oli siis meillä myös kesää 2018 vaikeampi metsäpalokesä. Kesällä 2006 kuivuus koetteli Pohjois-Euroopassa erityisesti Suomea ja Viroa (kuva 4). Myös kesä 2006 oli selvästi tavanomaista lämpimämpi koko Pohjois-Euroopassa, mutta ei aivan yhtä lämmin kuin kesä 2018 (kuva 4).



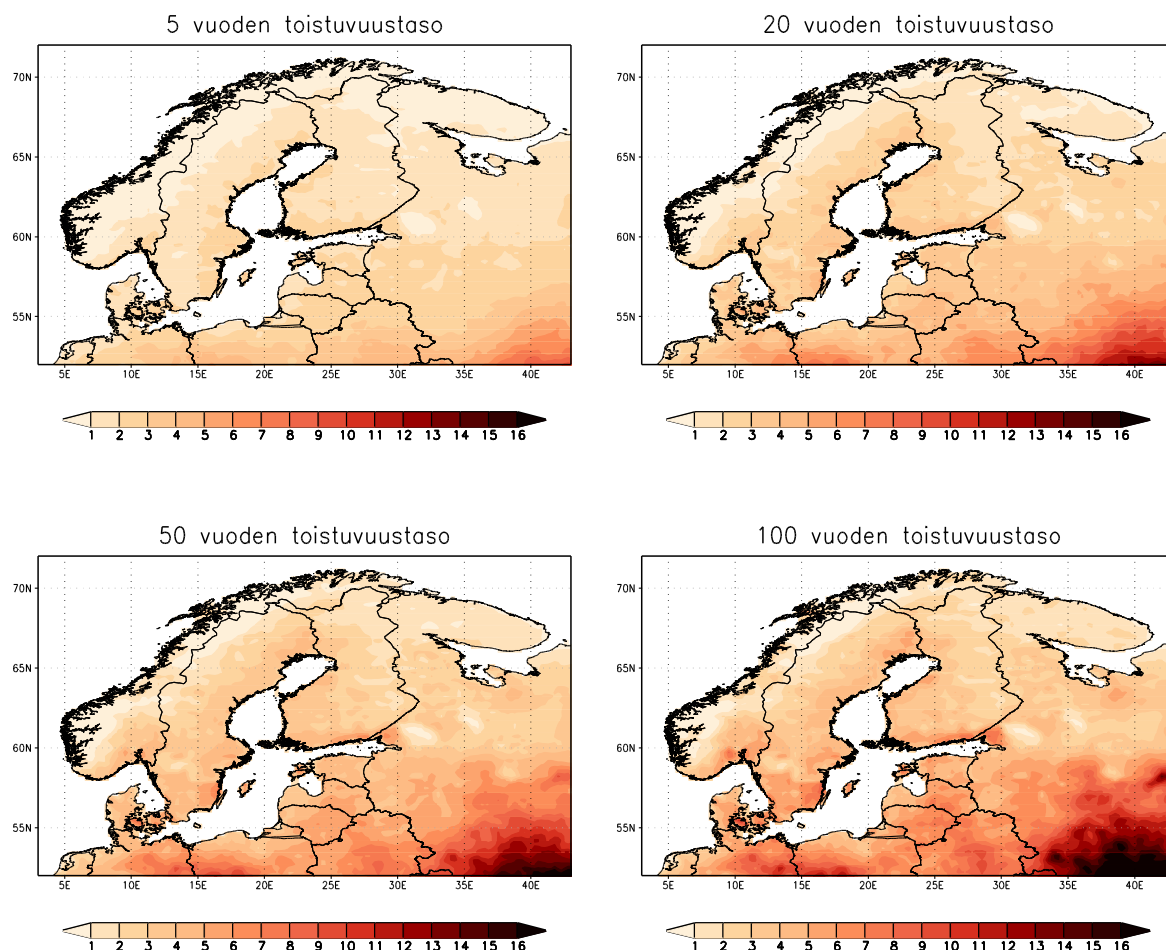
**Kuva 3.** Keskilämpötilan poikkeama (vas.) ja sademäärän osuus normaalista (oik.) touko-syyskuussa vuonna 2018 jakson 1979–2019 keskiarvoon verrattuna ERA5-aineiston mukaan.



**Kuva 4.** Keskilämpötilan poikkeama (vas.) ja sademäärän osuus normaalista (oik.) touko-syyskuussa vuonna 2006 jakson 1979–2019 keskiarvoon verrattuna ERA5-aineiston mukaan.

### 3.2. Metsäpaloriskin toistuvuustasot ja toistuvuusajat jaksolla 1979–2019

Touko-syyskuun jaksoa kuvaavan vuosittaisen metsäpaloriskin (SSR) 5, 20, 50 ja 100 vuoden toistuvuustasot Pohjois-Euroopan alueella jakson 1979–2019 perusteella määritettyinä esitetään kuvassa 5. Kuvasta nähdään, että Suomessa ja Ruotsissa paloriski on Itämeren rannikon läheisyydessä suurempi kuin sisämaassa. Pienin paloriski Fennoskandian alueella on Skandien vuoristoalueelta Kuolan niemimaalle ulottuvalla alueella. Baltiassa ja Valko-Venäjällä toistuvuustasot ovat pääosin hieman suurempia kuin Fennoskandiassa kuvastaen keskimäärin paloherkempiä sääolosuhteita. Moskovan seudulla ja sieltä etelään paloriski kasvaa selvästi; näillä alueilla toistuvat jo kerran viidessä vuodessa suunnilleen yhtä paloherkät tai paloherkemmät olosuhteet kuin Suomen ja Ruotsin rannikkoalueilla kerran 50 tai kerran 100 vuodessa. Vastaavat karttakuvat yksittäisten kuukausien paloriskin toistuvuustasoille toukokuusta syyskuuhun esitetään raportin lopusta löytyvissä liitekuvuissa L1–L5. Yksittäisten kuukausien toistuvuustasot ovat pääsääntöisesti koko kesäkauden vastaavaa toistuvuustasoa suurempia. Lisäksi yksittäisten kuukausien paloriskin toistuvuustasojen alueellisessa jakaumassa nähdään enemmän arvion epävarmuutta ilmentävää satunnaista vaihtelua.



**Kuva 5.** Touko-syyskuun metsäpaloriskin (SSR-indeksin) 5, 20, 50 ja 100 vuoden toistuvuustasot. Toistuvuustasot on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.

Toistuvuustasojen avulla määritellyt touko-syyskuun metsäpaloriskin toistuvuusajat vuosina 1979–2019 on esitetty liitekuvuissa L6–L12. Kesä 2018 nousee aineistosta esiin poikkeuksellisen korkean paloriskin vuotena lähes koko alueella. Niin Suomessa, Ruotsissa kuin Norjan eteläosissa kesän 2018 olosuhteita vastaavan metsäpaloriskin toistuvuusajaksi on laajoilla

alueilla arvioitu yli 50 vuotta. Toisin sanoen yhtä paloherkät olosuhteet toistuisivat keskimäärin harvemmin kuin kerran 50 vuodessa.

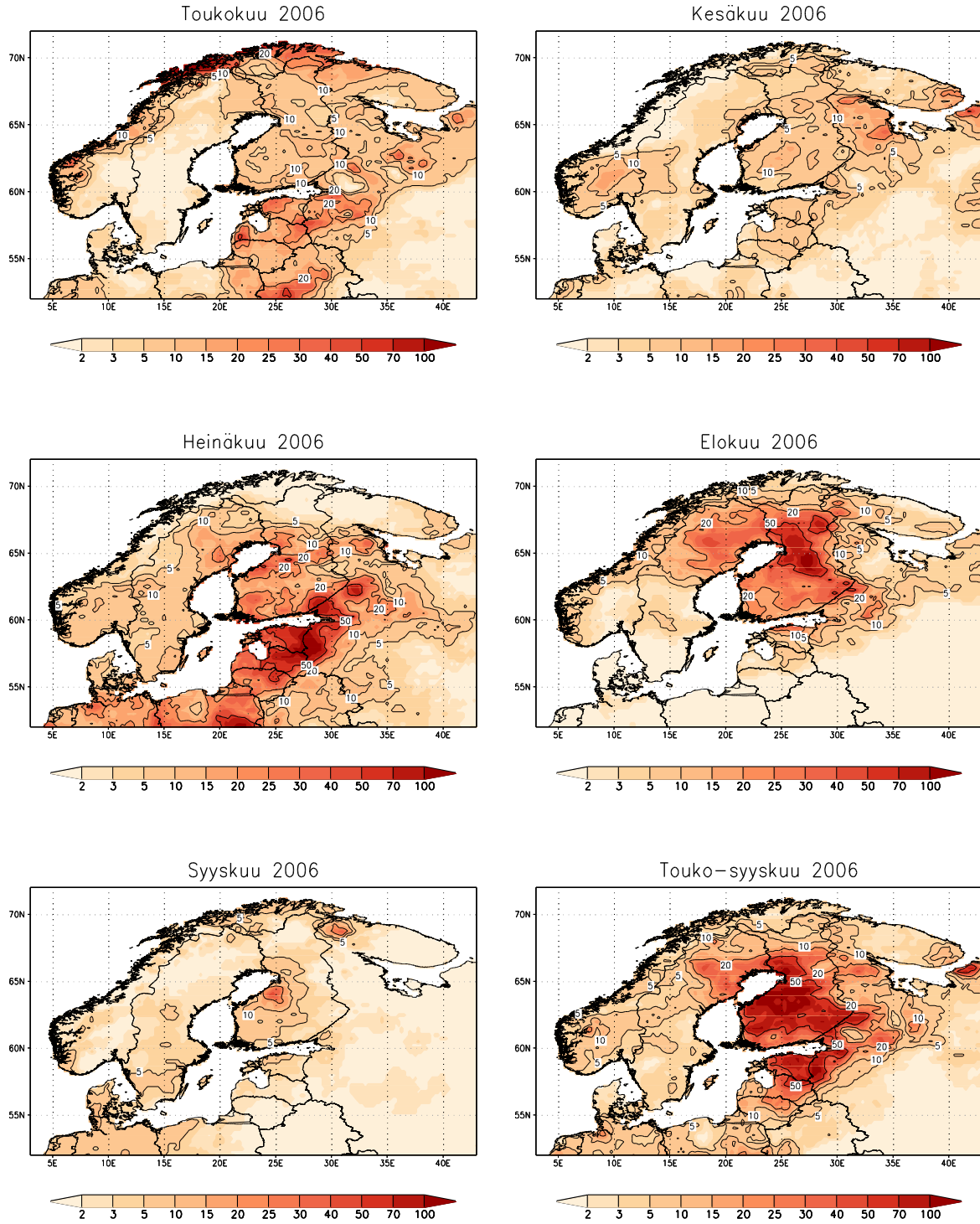
Suomessa erityisen korkean paloriskin vuotena näyttäytyy tulosten mukaan myös vuosi 2006. Laajoilla alueilla maan keskivaiheilla sekä Lapin lounaisosissa myös kesän 2006 metsäpaloriskin toistuvuusajaksi on arvioitu yli 50 vuotta. Alueellisesti erityisen korkean paloriskin kesinä voidaan nostaa esiin myös muun muassa kesä 1994 Ruotsissa, kesät 1980 ja 1997 Lapissa ja kesä 2013 Kuolan niemimaalla sekä kesä 2010 Venäjällä ja kesä 2015 Valko-Venäjällä. Laajalti harvinaisen korkean paloriskin kesiä olivat myös vuodet 1992, 1999 ja 2002.

Verrattaessa metsäpaloriskin toistuvuusaikoja palotilastoihin voidaan havaita, että Suomen viime vuosien pahin metsäpalokesä 2006 nousee vaikean metsäpalokesän 2018 ohella laajalti esiin erittäin korkean paloriskin kesänä. Myös paloalassa kärkipäätä edustavan kesän 1997 metsäpaloriskin toistuvuusaika oli Lapin lisäksi suurimmassa osassa muutakin maata yli viisi vuotta. Myös palojen lukumäärässä toiseksi sijoittuvan kesän 2002 paloriskin toistuvuusaika vaihteli enimmäkseen 2–20 vuoden välillä.

Ruotsissa kesä 2018 oli paloriskin toistuvuusajan perusteella arvioituna selvästi otollisin vuosi metsäpalojen esiintymiselle. Ruotsissa niin ikään aktiivisina metsäpalovuosina 1997, 2006 ja 2008 metsäpaloriski oli myös keskimääräistä suurempi. Sen sijaan Västmanlandin suurpalosta muistettavan kesän 2014 metsäpaloriskin toistuvuusaika oli enintään keskitasoa. Yksittäiset suurpalot ovat siis mahdollisia paloriskin näkökulmasta melko tavanomaisinakin kesinä. Kesän 2018 jälkeen metsäpaloriskin toistuvuusaikojen perusteella potentiaalisimmat metsäpalokesät Ruotsissa olisivat olleet vuodet 1992 ja 1994. Sjöströmin ja Granströmin (2020) Ruotsin viime aikojen palohistoriaa käsittelevä yhteenveto ei kuitenkaan ulotu näin kauas historiaan.

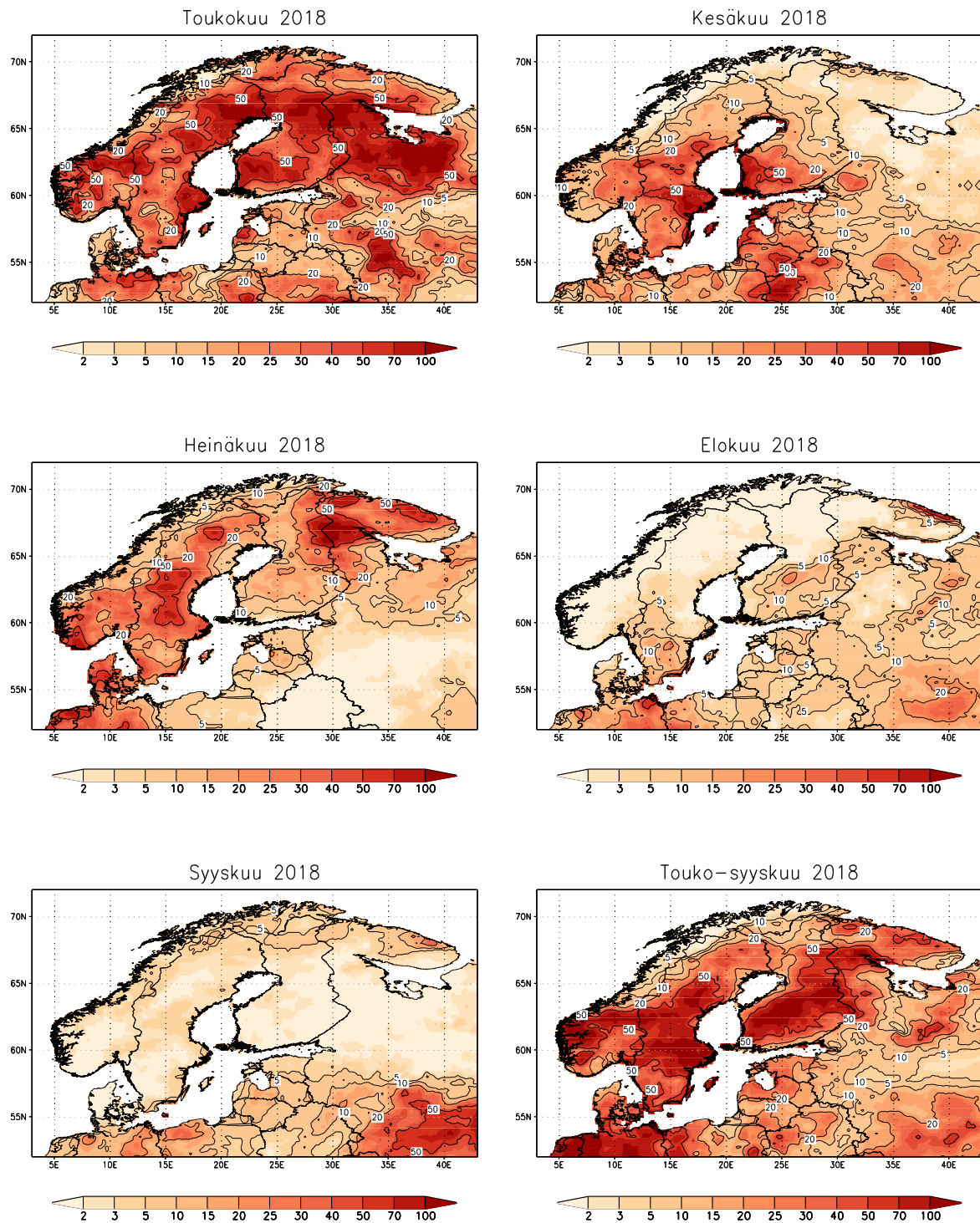
Kuvissa 6 ja 7 on vielä esitetty metsäpaloriskin toistuvuusajat kuukausittain tarkasteltuna kesinä 2006 ja 2018, jotka olivat siis Suomessa sekä koko kesäkauden paloriskin että toteutuneen paloalan perusteella arvioiden vaikeimmat metsäpalokesät viimeisten reilun parinkymmenen vuoden aikana. Kesällä 2006 metsäpaloriski oli lähes koko maassa selvästi tavanomaista suurempi kaikkina kuukausina toukokuusta syyskuuhun (kuva 6). Vain heinäkuussa paloriski oli keskimääräistä pienempi Pohjois-Lapissa ja syyskuussa paikoin Itä- ja Pohjois-Suomessa. Erityisesti elokuussa paloriski oli poikkeuksellisen korkea Kainuussa, Pohjois-Pohjanmaalla ja Etelä-Lapissa.

Kesällä 2018 paloriskin toistuvuusaika oli toukokuussa monin paikoin yli 50 vuotta, eli paloriski oli erittäin korkea (kuva 7). Kesäkuussa tilanne säilyi samanlaisena Lounais-Suomessa sekä suuressa osassa Ruotsia. Heinäkuussa metsäpaloriskin toistuvuusaika oli osassa Ruotsia yli 50 vuotta. Suomessa metsäpaloriskin toistuvuusaika oli heinäkuussa enimmäkseen 10–50 vuotta eli harvinaisen suuri, mutta kuitenkin enimmäkseen jonkin verran pienempi kuin Ruotsissa. Vain aivan eteläisimmässä Suomessa, missä saatiin heinäkuun alussa varsin runsaita vesisateita, paloriskin toistuvuusaika oli heinäkuussa alle 10 vuotta. Elokuussa Lapin runsaat sateet sammuttivat paloriskin, mutta niin Suomen kuin Ruotsinkin eteläosissa paloriski oli vielä paljon tavanomaista suurempi. Syyskuussa näilläkin alueilla paloriski hiipui. Poikkeuksellisin kuivuus ja paloriski keskittyivät vuonna 2018 siis alkukesään ja heinäkuuhun, kun taas kesällä 2006 paloriski pysyi Suomessa hyvin korkeana läpi kesän.



**Kuva 6.** Metsäpälöriskin (MSR- ja SSR-indeksit) toistuvuusaika (vuosia) kuukausittain touko-syyskuussa 2006 sekä koko touko-syyskuun jakson yli arvioituna. Toistuvuusajat on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.





**Kuva 7.** Metsäpälöriskin (MSR- ja SSR-indeksit) toistuvuusaika (vuosia) kuukausittain touko-syyskuussa 2018 sekä koko touko-syyskuun jakson yli arvioituna. Toistuvuusajat on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.

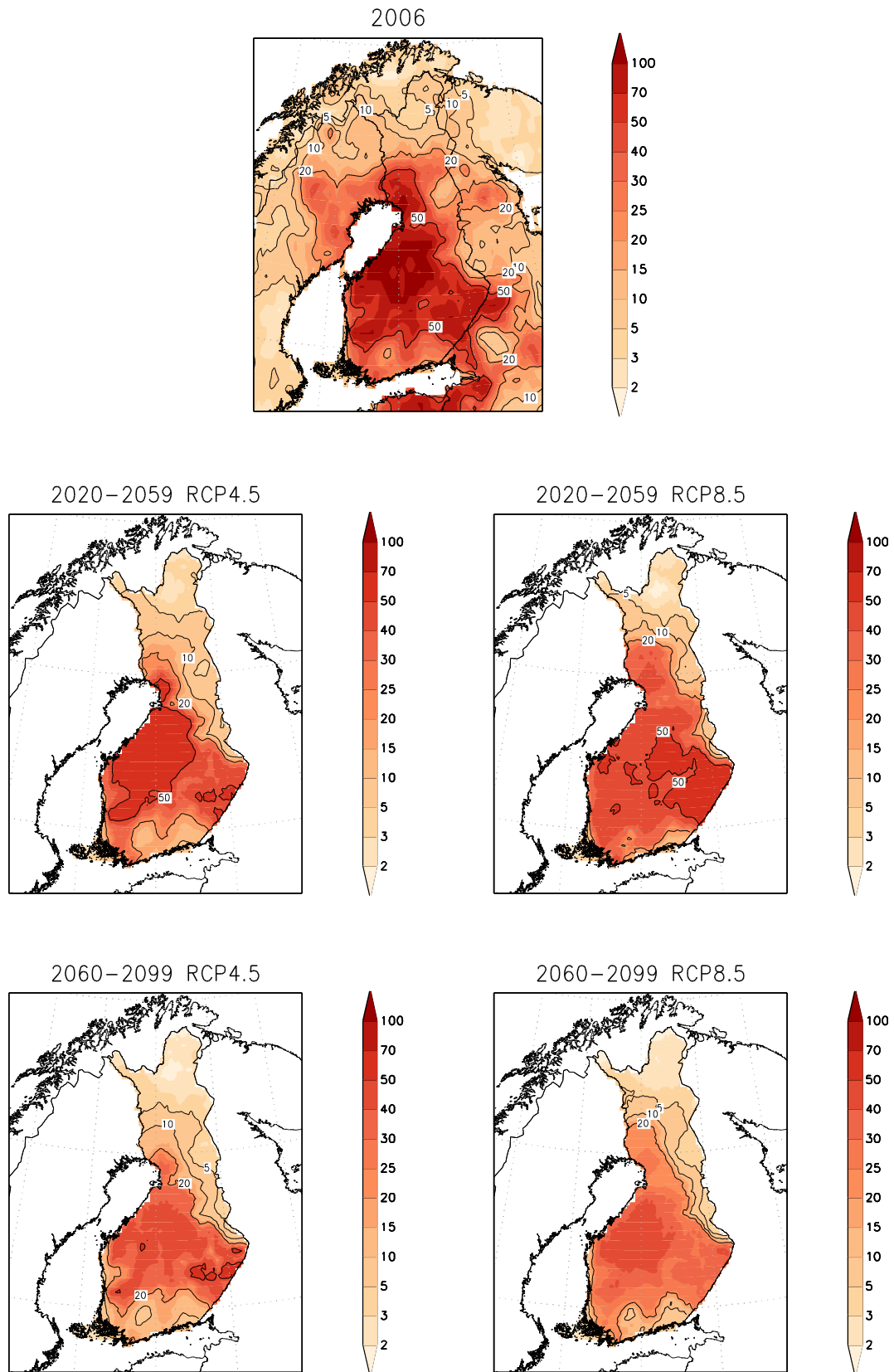


### 3.3 Ilmastonmuutoksen vaikutus korkean metsäpaloriskin toistuvuusaikoihin

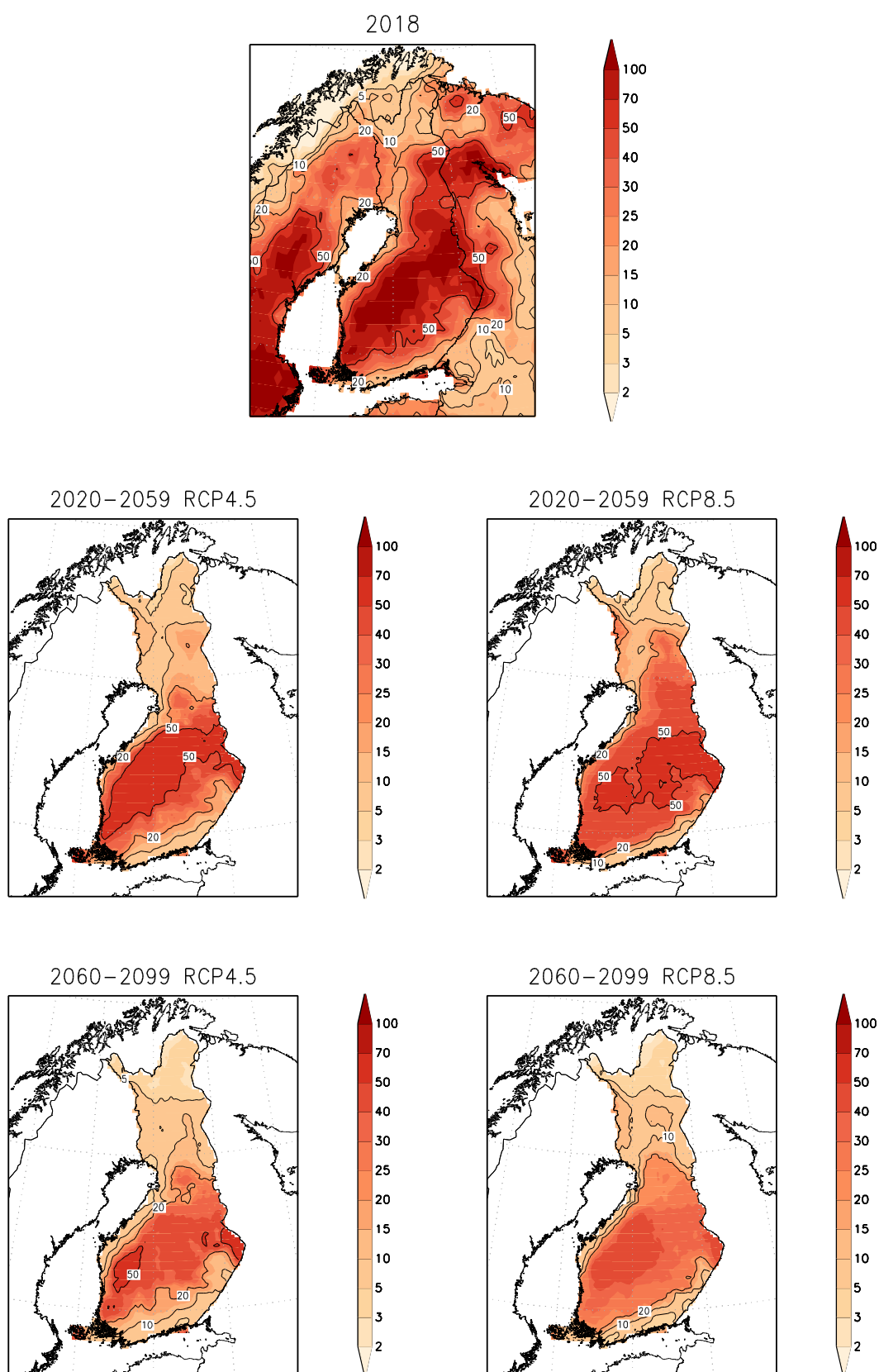
Kesien 2006 ja 2018 metsäpaloriskiä vastaava paloriskin toistuvuusaika jaksoilla 2020–2059 ja 2060–2099 RCP-skenaarioissa 4.5 ja 8.5 on esitetty kuvissa 8 ja 9 viiden käytössä olleen ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvona. Vaaleiden värisävyjen lisääntyminen karttakuvissa merkitsee kesien 2006 ja 2018 olosuhteita vastaavien toistuvuusaikojen pientymistä ja siiten siis paloriskin kasvamista. Mallitulosten keskiarvon perusteella arvioituna vastaavat kesät toistuisivat edelleen jaksolla 2020–2059 harvemmin kuin kerran 50 vuodessa niillä alueilla, joilla olosuhteet olivat kesinä 2006 ja 2018 kaikkein poikkeuksellisimmat. Näillä alueilla yhtä paloherkkien kesien toistuvuusajat pysyisivät korkeina vielä vuosisadan lopullakin, vaikka toistuvuusajat jonkin verran pienenevätkin, etenkin korkeiden kasvihuonekaasupäästöjen RCP8.5-skenaariossa.

Eri ilmastonmuutosmallien mukaiset tulokset poikkeavat kuitenkin huomattavasti toisistaan. Tämä nähdään liitekuvista L13–L16, joissa esitetään kesän 2018 metsäpaloriskin arvioitu toistuvuusaika malli kerrallaan molemmilla jaksoilla 2020–2059 ja 2060–2099 sekä molempien tarkasteltujen kasvihuonekaasujen päästöskenaarioiden mukaisesti. Brittiläisen HadGEM2-ES-mallin tuottamassa ilmastossa kesän 2018 kaltaiset olosuhteet toistuisivat jo jaksolla 2020–2059 noin kerran 5–10 vuodessa ja vuosisadan lopulla vielä useammin, RCP4.5-skenaarion toteutuessa noin kerran 3–10 vuodessa, mutta RCP8.5-skenaarion toteutuessa lähes koko maassa jopa useammin kuin joka toinen vuosi. Tämän äärimmäisen skenaarion toteutuessa siis useampi kuin joka toinen kesä olisi vuosisadan lopulla vielä kesää 2018 pahempi metsäpalokesä. Muiden tarkastelussa mukana olleiden ilmastonmuutosmallien tulokset eivät kuitenkaan anna tukea näin voimakkaalle paloriskin kasvulle. Kuitenkin myös CanESM2- ja ennen kaikkea GFDL-CM3-malli ennustavat kesän 2018 olosuhteita vastaavan paloriskin toistuvuusajan selvästi pienevän vuosisadan kuluessa. Näiden mallien tulosten mukaan kesän 2018 kaltaiset olosuhteet eivät kuitenkaan toistuisi vuosisadan lopulla suuressa osassa maata sittenkään kuin kerran noin 10–50 vuodessa, paitsi GFDL-CM3-mallissa RCP8.5-skenaarion toteutuessa laajalti noin kerran 5–20 vuodessa. Sitä vastoin mallien CNRM-CM5 ja MIROC5 simulaatioiden tulokset eivät anna juuri minkäänlaisia viitteitä korkean metsäpaloriskin toistuvuusaikojen lyhenemisestä. Yksittäisten mallien toistuvuusaikojä tarkastellessa on syytä myös huomata, että pitkien toistuvuusaikojen tarkat arvot ovat hyvin epävarmoja. Jo yksikin hyvin korkean paloriskin vuosi aineistossa voi heilauttaa toistuvuusaikaa kymmenillä vuosilla.

Liitekuvista L17–L20 on vielä esitetty arviot touko-syyskuun metsäpaloriskin (SSR) 5, 20, 50 ja 100 vuoden toistuvuustasoista Suomen alueella jaksoilla 1980–2019, 2020–2059 ja 2060–2099 sekä RCP4.5- että RCP8.5-päästöskenaarioissa viiden tarkastellun ilmastonmuutosmallin harhakorjattujen tulosten keskiarvoina. Mallitulosten mukainen korkean metsäpaloriskin alueellinen jakauma muistuttaa hyvin paljon uusanalyysin perusteella arvioitua (kuva 5) korkeimman paloriskin alueiden löytyessä rannikoiden läheisyydestä, etenkin läheltä etelärannikkoa. Toistuvuustasoja tarkasteltaessa paloriskin kasvu nähdään karttakuvissa värisävyjen tummenemisena tulevaisuuteen sijoittuvilla ajanjaksoilla. Esimerkiksi 20 vuoden arvioitu toistuvuustaso jaksolla 1980–2019 näyttäisi likimain vastaavan suuruusluokaltaan 50 vuoden toistuvuustason arviota jaksolla 2060–2099. Etenkin suurten päästöjen RCP8.5-skenaariossa viiden vuoden toistuvuustaso kasvaa jaksolla 2060–2099 yleisesti suuremmaksi kuin arvioitu 20 vuoden toistuvuustaso jaksolla 1980–2019. Siten lähimenneisyydessä kerran 20 vuodessa toistuneet vaikeat metsäpalokesät voisivat toistua vuosisadan lopulla jopa useammin kuin kerran viidessä vuodessa. Kuten liitekuvista L13–L16 nähtiin, eri ilmastonmuutosmallien tuloksiin perustuvat arviot paloriskin kasvusta poikkeavat kuitenkin suuresti toisistaan.



**Kuva 8.** Kesän (touko-syyskuu) 2006 metsäpaloriskin toistuvuusaika (vuosia; yläkuva) ja vastaavan metsäpaloriskin arvioitu toistuvuusaika viiden ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvona jaksoilla 2020–2059 ja 2060–2099 RCP4.5- ja RCP8.5-päästöskenaarioissa.



**Kuva 9.** Kesän (touko-syyskuu) 2006 metsäpaloriskin toistuvuusaika (vuosia; yläkuva) ja vastaavan metsäpaloriskin arvioitu toistuvuusaika viiden ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvona jaksoilla 2020–2059 ja 2060–2099 RCP4.5- ja RCP8.5-päästöskenaarioissa.

## 4 Yhteenveto ja johtopäätökset

Kesä 2018 oli Pohjois-Euroopassa laajalti ennätyksellisen lämmin ja hyvin kuiva. Sääolosuhteet olivat siten erittäin suotuisat metsäpalojen esiintymiselle. Metsäpalariskin toistuvuusaika-analyysin perusteella yhtä paloherkät olosuhteet toistuvat laajoilla alueilla niin Suomessa kuin Ruotsissa harvemmin kuin kerran 50 vuodessa. Myös Ruotsissa tehtyjen analyysien perusteella korkean paloriskin päiviä oli siellä kesällä 2018 huomattavasti enemmän kuin yhtenäkkään toisena vuotena edellisten 20 vuoden aikana (Sjöström ja Granström, 2020).

Ruotsin useissa laajoissa paloissa tuhoutui kesän 2018 aikana lähes 25 000 hehtaaria metsää. Myös Suomessa metsäpaloja esiintyi paljon, joskaan ei yhtä paljon kuin kesällä 2006. Toisin kuin Ruotsissa, Suomessa kesä 2006 oli myös sääolosuhteiden avulla arvioidun metsäpalariskin perusteella laajalti vähintään yhtä suotuisa metsäpalojen esiintymiselle kuin vuoden 2018 kesä. Yleisesti ottaen metsäpalojen esiintyminen on viimeisten reilun 20 vuoden aikana vaihdellut sekä Suomessa että Ruotsissa varsin samankaltaisesti vuoden sääolosuhteiden mukaan. Kuivimpina kesinä paloja syttyy moninkertaisesti enemmän kuin viileinä ja sateisina kesinä. Palojen kokonaismäärä on Ruotsissa jonkin verran suurempi kuin Suomessa heijastellen maan suurempaa pinta-alaa ja väkilukua. Laaja-alaisten metsäpalojen esiintymisessä maiden välillä on kuitenkin suuri ero. Ruotsissa on 1990-luvun puolivälin jälkeen sattunut noin kymmenen kertaa enemmän yli 100 hehtaarin metsäpaloja kuin Suomessa ja myös useampia yli 1000 hehtaarin paloja, kun Suomessa saman ajanjakson suurin metsäpalo poltti noin 200 hehtaaria Tammelassa kesäkuussa 1997. Kesän 2018 suurin metsäpalo Suomessa poltti vain noin 80 hehtaaria maastoa Pyhärannassa.

Ilmastonmuutoksen vaikutuksesta metsäpalariskin odotetaan Pohjois-Euroopassa kasvavan. Tämä johtuu ennen kaikkea lämpenemisen seurauksena voimistuvasta haihdunnasta. Myös pitkät poutajaksot kesällä saattavat jonkin verran yleistyä ja lumen aikaisempi sulaminen keväällä mahdollistaa maaperän kuivumisen entistä aikaisemmin alkukesällä. Tässä työssä oli tarkoitus havainnollistaa vielä tuoreessa muistissa olevan kesän 2018 avulla miten usein vastaavat kesät toistuvat tulevaisuudessa metsäpalariskin näkökulmasta tarkasteltuna. Tyhjentävää vastausta tähän ei saatu, koska eri ilmastonmuutosmallien antamat tulokset poikkeavat huomattavasti toisistaan. Mallitulosten keskiarvon perusteella yhtä vaikeat metsäpalokesät kuin kesä 2018 olisivat kuitenkin melko harvinaisia vielä kuluvan vuosisadan lopullakin. Etenkään CNRM-CM5- ja MIROC5-mallien simulaatioiden tulosten perusteella arvioituna kesää 2018 vastaavan metsäpalariskin toistuvuusaika ei mainittavasti lyhenisi, vaikka kesälämpötilat kohoaisivat 3–5 asteella. Erittäin voimakkaan lämpenemisen tuottavan GFDL-CM3-mallin tulosten mukaan metsäpalariskin näkökulmasta kesän 2018 kaltaiset olosuhteet kuitenkin yleistyisivät selvästi. Vielä voimakkaammin korkean metsäpalariskin kesät yleistyvät HadGEM2-ES-mallin tulosten perusteella arvioituina. Tämä saattaa osittain selittyä mallin ennustamalla suhteellisen kosteuden vähentymisellä. Myös HadGEM2-ES-mallin ennustama lämpeneminen on voimakkaampaa kuin muissa tarkastelluissa ilmastomalleissa keskimäärin. Toisaalta hyvin harvoin toistuvien ilmiöiden toistuvuusaikojen tarkka arviointi noin 40 vuoden aineistosta on hyvin epävarmaa.

Näyttäisi siis siltä, että vaikka ilmasto lämpenisi pari kolme astetta, yhtä vaikeat metsäpalokesät kuin 2018 tai 2006 olisivat edelleen varsin harvinaisia, keskimäärin ehkä vain muutamana vuosikymmenen välein toistuvia. Tällä hetkellä ilmasto lämpenee Suomessa vajaat puoli astetta vuosikymmenessä, joten ei ole odotettavissa, että ainakaan ennen kuluvan vuosisadan puoliväliä tulisi montaa kesiä 2006 ja 2018 pahempaa metsäpalokesää. Toisaalta mikäli kasvihuonekaasujen pitoisuudet ilmakehässä jatkavat voimakasta kasvua ja ilmaston lämpeneminen jatkuu nykyisellä tai jopa kiihtyvällä vauhdilla edelleen vuosisadan loppupuolella, on mahdollista, että tämänkaltaiset metsäpalokesät muuttuvat jopa yleisiksi.

Metsäpalojen torjunnan näkökulmasta keskeistä on havaita syttyneet palot ja päästä palopaikoille nopeasti. Suomessakin tämä nähtiin kesällä 2018, jolloin suurimmat palot roihusivat etupäässä syrjäseuduilla. Ruotsissa on tutkittu metsäpalojen keskikoon suhdetta vasteaikaan palon havaitsemisesta palokunnan saapumiseen ja palojen keskikoon on todettu vasteajan kasvaessa kasvavan lähes eksponentiaalisesti (Sjöström ja Granström, 2020). Lisäksi vasteaika hälytyksestä palokunnan saapumiseen on viimeisten parinkymmenen vuoden aikana Ruotsissa jatkuvasti hitaasti kasvanut. Suomessa metsäpalojen sammuttaminen on haja-asutusalueilla pitkälti paikallisten vapaapalokuntien vastuulla, minkä takia palokunta saadaan usein palopaikalle suhteellisen nopeasti hälytyksen jälkeen. Maaseudun edelleen autioituessa on kuitenkin riskinä, pystytäänkö harvaan asutuilla alueilla kaikki palot tulevaisuudessa havaitsemaan riittävän nopeasti, jotta osa paloista ei pääsisi leviämään suurpaloiksi, joiden sammuttaminen on huomattavasti työläämpää kuin ajoissa havaitun vasta syttyneen pienen palon sammuttaminen.

## Kiitokset

Tämä raportti on koostettu Ilmatieteen laitoksella toteutetun ja Palosuojelurahaston 1.11.2019–29.2.2020 osittain rahoittaman hankkeessa ”Metsäpalokesä 2018 muuttuvassa ilmastossa – poikkeuksellinen vuosi vai uusi normaali?” saatujen tulosten pohjalta. Kiitämme lämpimästi Palosuojelurahastoa tutkimuksen rahoittamisesta ja tutkimushankkeen ohjausryhmää osallistumisesta ohjausryhmätyöskentelyyn sekä hankkeen tuloksista tiedottamiseen. Lisäksi kiitämme Juha Aaltoa raportin kommentoimisesta.

ERA5-uusanalyysiaineisto ladattiin Copernicuksen ilmastonmuutospalvelusta osoitteesta <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>. Kiitämme myös kaikkia instituutioita, jotka ovat tuottaneet Taulukossa 1 luetellut CMIP5-malliaineistot sekä muita tahoja, jotka ovat tehneet aineistot vapaasti ladattaviksi ja ylläpitäneet aineiston latausportaaleja.

## Kirjallisuusluettelo

- Aalto, J., P. Pirinen ja K. Jylhä, 2016: New gridded daily climatology of Finland: Permutation-based uncertainty estimates and temporal trends in climate. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 3807–3823.
- Bondur, V. G., 2011: Satellite monitoring of wildfires during the anomalous heat wave of 2010 in Russia. *Izvestiya, Atmos. Ocean. Phys.*, **47**, 1039–1048.
- Collins, W. J., N. Bellouin, M. Doutriaux-Boucher, N. Gedney, P. Halloran, T. Hinton, J. Hughes, C. D. Jones, M. Joshi, S. Liddicoat, G. Martin, F. O’Connor, J. Rae, C. Senior, S. Sitch, I. Totterdell, A. Wiltshire ja S. Woodward, 2011: Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 1051–1075.
- Dee, D. P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Kållberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thépaut ja F. Vitart, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **137**, 553–597.
- de Groot, W. J., M. D. Flannigan ja A. S. Cantin, 2013: Climate change impacts on future boreal fire regimes. *Forest Ecol. Manage.*, **294**, 35–44.
- Donner, L. J., B. L. Wyman, R. S. Hemler, L. W. Horowitz, Y. Ming, M. Zhao, J.-C. Golaz, P.

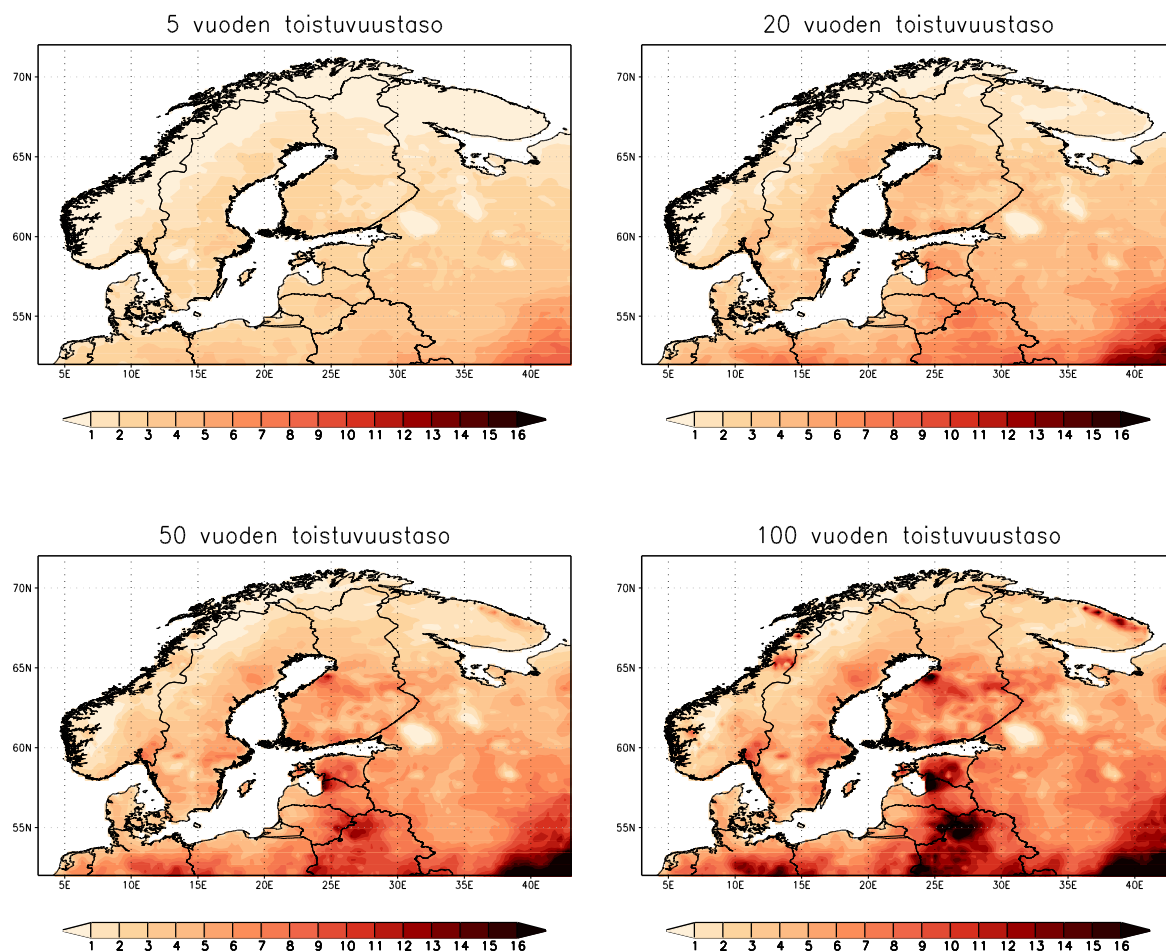
- Ginoux, S.-J. Lin, M. D. Schwarzkopf, J. Austin, G. Alaka, W. F. Cooke, T. L. Delworth, S. M. Freidenreich, C. T. Gordon, S. M. Griffies, I. M. Held, W. J. Hurlin, S. A. Klein, T. R. Knutson, A. R. Langenhorst, H.-C. Lee, Y. Lin, B. I. Magi, S. L. Malyshev, P. C. D. Milly, V. Naik, M. J. Nath, R. Pincus, J. J. Ploshay, V. Ramaswamy, C. J. Seman, E. Shevliakova, J. J. Sirutis, W. F. Stern, R. J. Stouffer, R. J. Wilson, M. Winton, A. T. Wittenberg ja F. Zeng, 2011: The dynamical core, physical parameterization, and basic simulation characteristics of the atmospheric component AM3 of the GFDL global coupled model CM3. *J. Climate*, **24**, 3484–3519.
- Flannigan, M. D, B. Stocks, M. Turetsky ja M. Wotton, 2009: Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biol.*, **15**, 549–560.
- Gilleland, E., R. W. Katz ja G. Young, 2005: Extreme toolkit (extRemes): weather and climate applications of extreme value statistics.  
<http://www.esig.ucar.edu/extremevalues/extreme.pdf>
- Haataja, V., 1993: *Tuntsan palo ja suuri nokisavotta*. Koillismaan Kirjapaino Oy, Kuusamo, 48 s.
- Hersbach, H. ja D. Dee, 2016: ERA5 reanalysis is in production. ECMWF Newsletter No. 147.
- IPCC, 2018: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor ja T. Waterfield (eds.)]. IPCC, 616 s.
- Katz, R. W., G. Brush ja M. Parlange, 2005: Statistics of extremes: Modeling ecological disturbances. *Ecology*, **86**, 1124–1134.
- Ketola, J., 2018: *Hevonkuudessa palaa isosti – Tilastollinen selvitys kesän 2018 metsäpalojen leviämisestä*. Pelastusopisto, Kuopio, 83 s.
- Kilpeläinen, A., S. Kellomäki, H. Strandman ja A. Venäläinen, 2010: Climate change impacts on forest fire potential in boreal conditions in Finland. *Clim. Change*, **103**, 383–398.
- Lehtonen, I., 2020: Maastopalot koettelevat Australiaa. *Ilmastokatsaus*, **22**(1), 8–10.
- Lehtonen, I. ja P. Pirinen, 2019a: 2018: An exceptionally warm thermal growing season in Finland. *FMI's Clim. Bull. Res. Lett.*, **1**(1), 5.
- Lehtonen, I. ja P. Pirinen, 2019b: 2018: An exceptionally dry thermal growing season in Finland. *FMI's Clim. Bull. Res. Lett.*, **1**(1), 6.
- Lehtonen, I., K. Ruosteenoja, A. Venäläinen ja H. Gregow, 2014: The projected 21st century forest-fire risk in Finland under different greenhouse gas scenarios. *Boreal Environ. Res.*, **19**, 127–139.
- Lehtonen, I., A. Venäläinen, M. Kämäräinen, H. Peltola ja H. Gregow, 2016: Risk of large-scale fires in boreal forests of Finland under changing climate. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **16**, 239–253.
- Migliavacca, M., A. Dosio, A. Camia, R. Hobourg, T. Houston-Durrant, J. W. Kaiset, N. Khabarov, A. A. Krasovskii, B. Marcolla, J. San-Miguel-Ayanz, D. S. Ward ja A. Cescatti, 2013: Modeling biomass burning and related carbon emissions during the 21st century in Europe. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, **118**, 1732–1747.
- Mäkelä, H. M., A. Venäläinen, K. Jylhä, I. Lehtonen ja H. Gregow, 2014: Probabilistic projections of climatological forest fire danger in Finland. *Clim. Res.*, **60**, 73–85.
- Osara, N. A., 1949: Kulovalkeat. Teoksessa: *Suuri Metsäkirja, 1 osa* [Kaleva, E. K. (toim.)], Werner Söderström Osakeyhtiö, Porvoo, 455–486.
- Parker, W. S., 2016: Reanalysis and observations: What's the difference? *Bull. Am. Meteorol.*

- Soc.*, **97**, 1565–1572.
- Parviainen, J., 1996: The impact of fire on Finnish forests in the past and today. Teoksessa: *Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia* [Goldammer, J. G. ja V. V. Furyaev (toim.)], Springer Netherlands, 55–64.
- Ruosteenoja, K., T. Vihma ja A. Venäläinen, 2019: Projected changes in European and North Atlantic seasonal wind climate derived from CMIP5 simulations. *J. Climate*, **32**, 6467–6490.
- Räisänen, J. ja O. Räty, 2013: Projections of daily mean temperature variability in the future: cross-validation tests with ENSEMBLES regional climate models. *Clim. Dyn.*, **41**, 1553–1568.
- Räty, O., J. Räisänen ja J. Ylhäisi, 2014: Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: intermodel cross-validation using ENSEMBLES simulations. *Clim. Dyn.*, **42**, 2287–2303.
- Saari, E., 1923: Kuloista etupäässä Suomen valtionmetsiä silmällä pitäen. *Acta For. Fenn.*, **26**, 1–142.
- Sherstyukov, B. G. ja A. B. Sherstyukov, 2014: Assessment of increase in forest fire risk in Russia till the late 21st century based on scenario experiments with fifth-generation climate models. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, **39**, 292–301.
- Shvidenko, A. Z. ja D. G. Schepaschenko, 2013: Climate change and wildfires in Russia. *Contemp. Probl. Ecol.*, **6**, 683–692.
- Sisäministeriö, 2019: *Kansallinen riskiarvio 2018*. Sisäministeriön julkaisuja 2019/5, 70 s.
- Sjöström, J. ja A. Granström, 2020: *Skogsbränder och gräsbränder i Sverige – Trender och mönster under senaste decennier*. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, Karlstad, 104 s.
- Statens offentliga utredningar, 2019: *Skogsbränderna sommaren 2018. Betänkande av 2018 års skogsbrandsutredning*. Statens offentliga utredningar 2019:7, Tukholma, 336 s.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer ja G. A. Meehl, 2012: An overview of CMIP5 and the experimental design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **93**, 485–498.
- van Vuuren, D. P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenović, S. J. Smith ja S. K. Rose, 2011: The representative concentration pathways: an overview. *Clim. Change*, **109**, 5–31.
- Van Wagner, C. E., 1987: *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 35, Ottawa, 37 s.
- Van Wagner, C. E. ja T. L. Pickett, 1985: *Equations and FORTRAN Program for the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 33, Ottawa, 18 s.
- Venäläinen, A., I. Lehtonen ja A. Mäkelä, 2016: *Laaja-alaisia metsäpaloja mahdollistavat säätilanteet Suomen ilmastossa*. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2016:3, Helsinki, 30 s.
- Virkkala, R. ja H. Toivonen, 1999: *Maintaining biological diversity in Finnish forests*. Suomen Ympäristökeskus, Helsinki, 56 s.
- Voldoire, A., E. Sanchez-Gomez, D. Salas y Méliá, B. Decharme, C. Cassou, S. Sénési, S. Valcke, I. Beau, A. Alias, M. Chevallier, M. Déqué, J. Deshayes, H. Douville, E. Fernandez, G. Madec, E. Maisonnave, M.-P. Moine, S. Planton, D. Saint-Martin, S. Szopa, S. Tyteca, R. Alkama, S. Belamari, A. Braun, L. Coquart ja F. Chauvin, 2013: The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Clim. Dyn.*, **40**, 2091–2121.
- von Salzen, K., J. F. Scinocca, N. A. McFarlane, J. Li, J. N. S. Cole, D. Plummer, D. Versegny, M. C. Reader, X. Ma, M. Lazare ja L. Solheim, 2013: The Canadian fourth generation atmospheric global climate model (CanAM4) – Part I: representation of physical

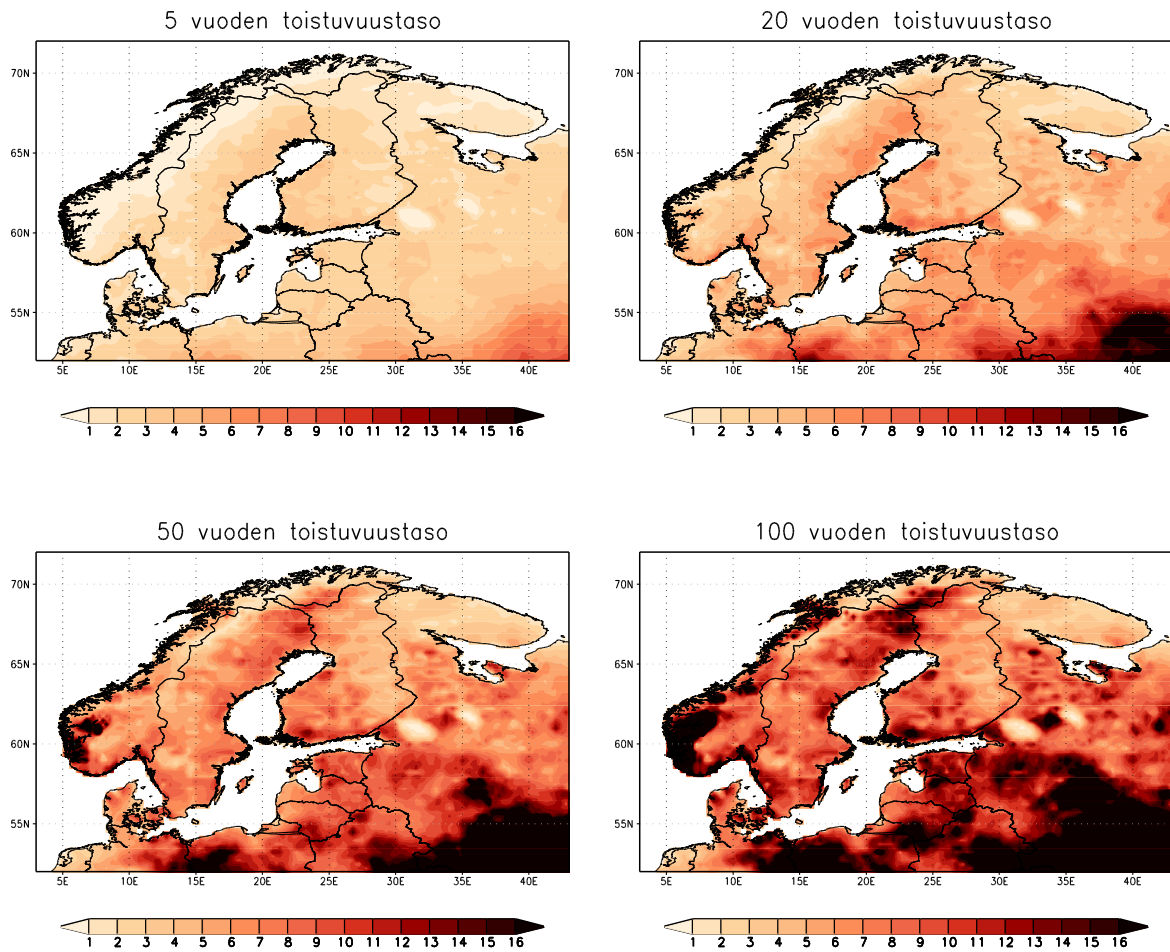
- processes. *Atmos. Ocean*, **51**, 104–125.
- Västmanland County Administrative Board, 2015: *Skogsbranden i Västmanland 2014. En dokumentation utgiven av Länsstyrelsen i Västmanlands Län*. Länsstyrelsen Västmanlands Län, Västerås, 32 s.
- Walker, X. J., J. L. Baltzer, S. G. Cumming, N. J. Day, C. Ebert, S. Goetz, J. F. Johnstone, S. Potter, B. M. Rogers, E. A. G. Schuur, M. R. Turetsky ja M. C. Mack, 2019: Increasing wildfires threaten historic carbon sink of boreal forest soils. *Nature*, **572**, 520–523.
- Watanabe, M., T. Suzuki, R. O'ishi, Y. Komuro, S. Watanabe, S. Emori, T. Takemura, M. Chikara, T. Ogura, M. Sekiguchi, K. Takata, D. Yamazaki, T. Yokohata, T. Nozawa, H. Hasumi, H. Tatebe ja M. Kimoto, 2010: Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*, **23**, 6312–6355.
- Wotton, B. M., C. A. Nock ja M. D. Flannigan, 2010: Forest fire occurrence and climate change in Canada. *Int. J. Wildland Fire*, **19**, 253–271.
- Yang, W., M. Gardelin, J. Olsson ja T. Bosshard, 2015: Multi-variable bias correction: application of forest fire risk in present and future climate in Sweden. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **15**, 2037–2057.



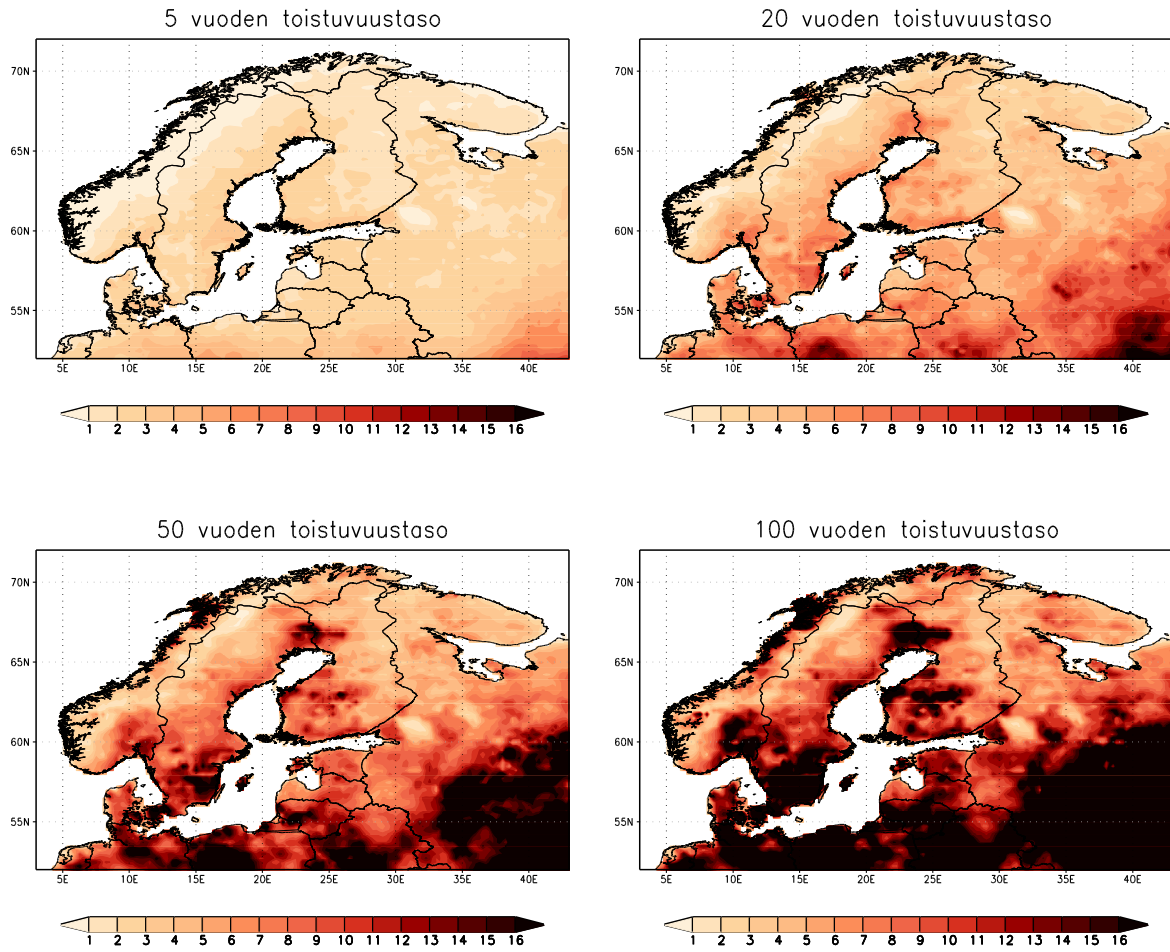
## Liitteet



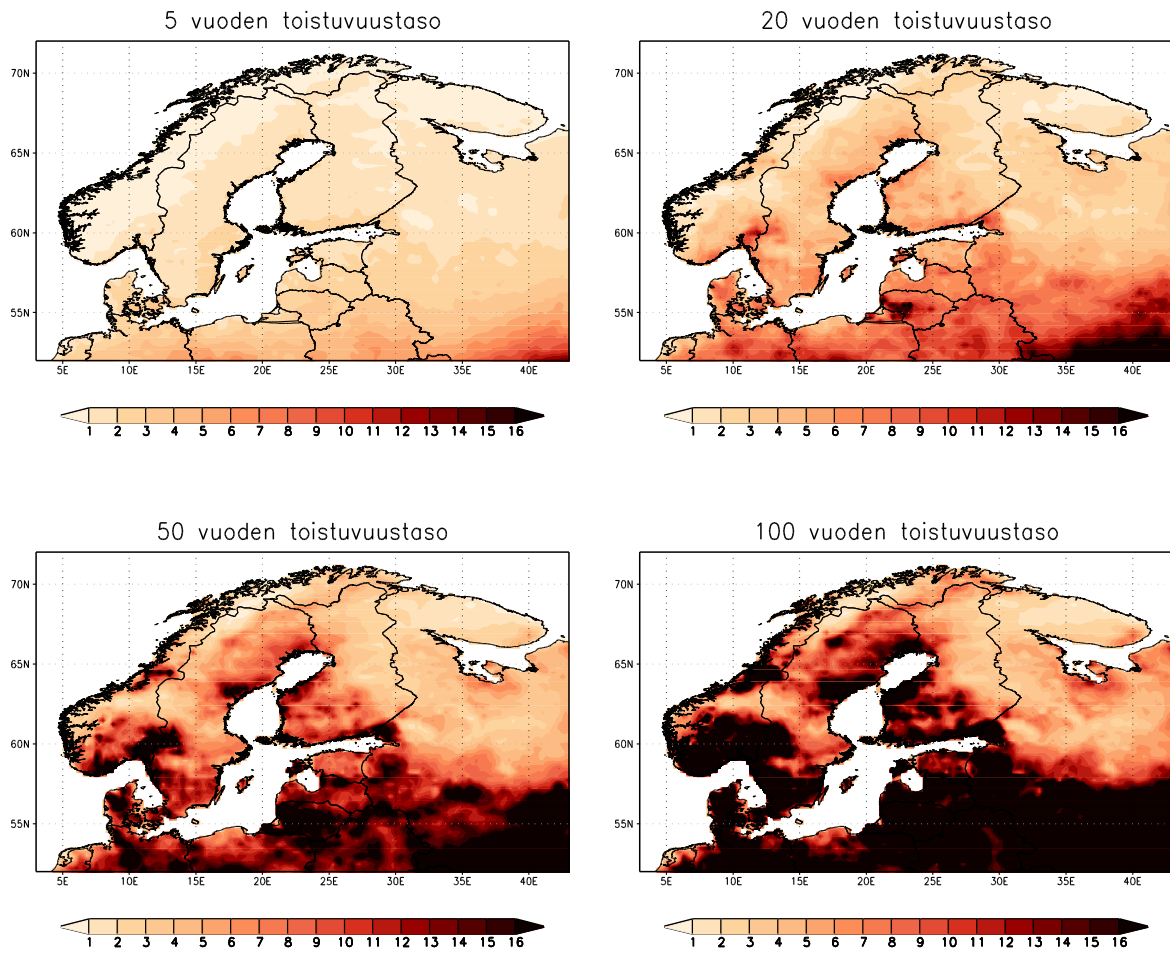
**Kuva L1.** Toukokuun metsäpalariskin (MSR-indeksin) 5, 20, 50 ja 100 vuoden toistuvuustasot. Toistuvuustasot on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.



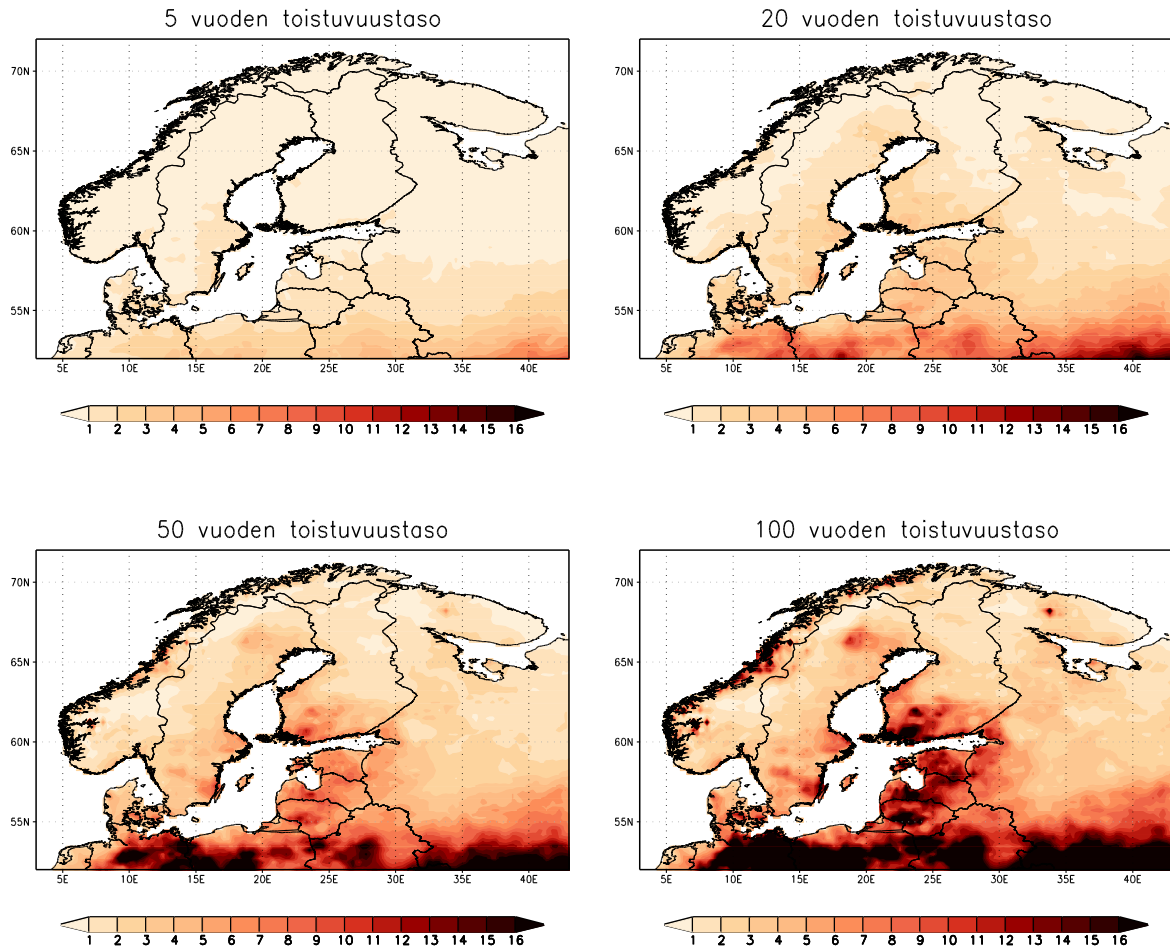
**Kuva L2.** Kesäkuun metsäpalariskin (MSR-indeksin) 5, 20, 50 ja 100 vuoden toistuvuustasot. Toistuvuustasot on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.



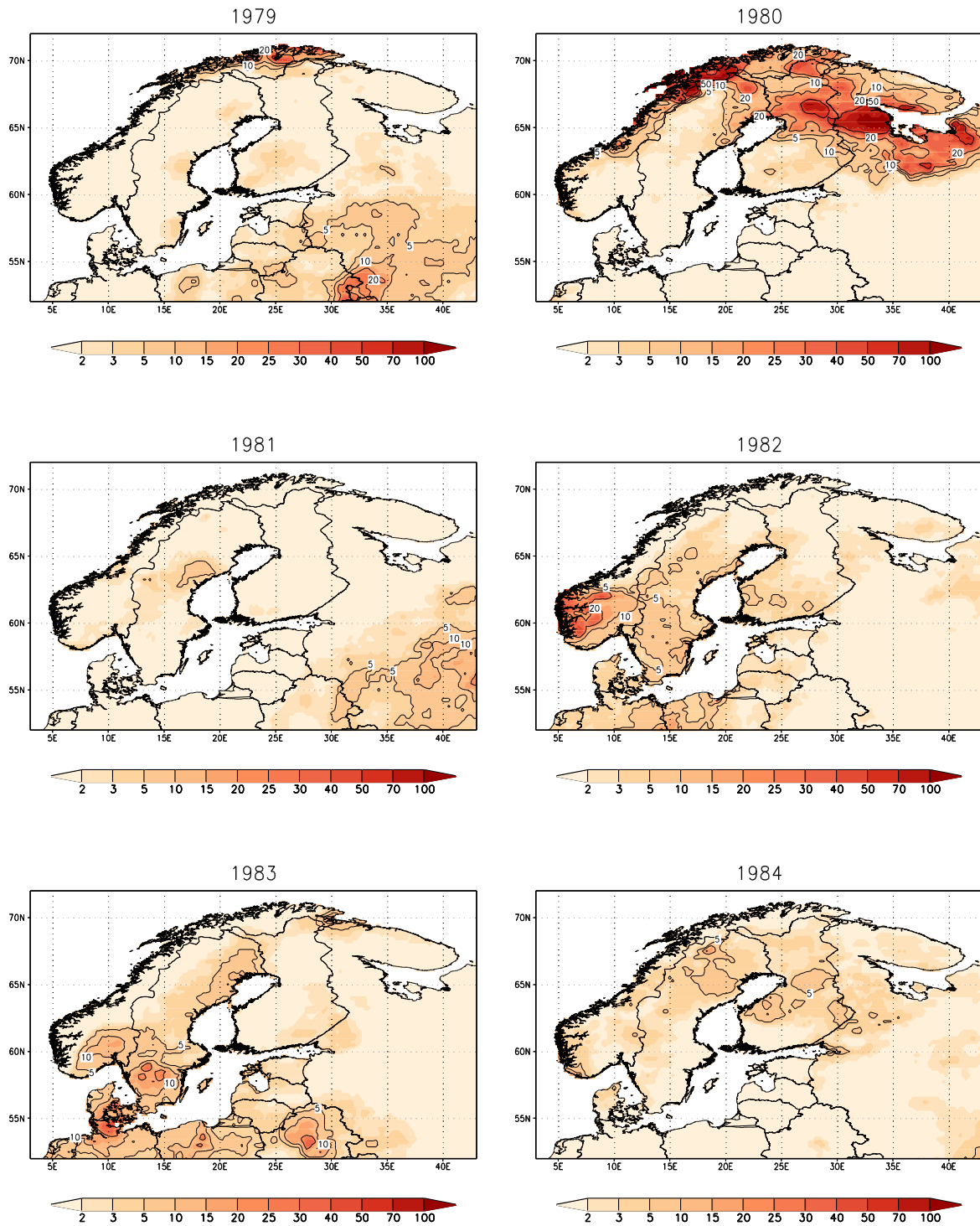
**Kuva L3.** Heinäkuun metsäpaloriskin (MSR-indeksin) 5, 20, 50 ja 100 vuoden toistuvuustasot. Toistuvuustasot on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.



**Kuva L4.** Elokuun metsäpalariskin (MSR-indeksin) 5, 20, 50 ja 100 vuoden toistuvuustasot. Toistuvuustasot on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.

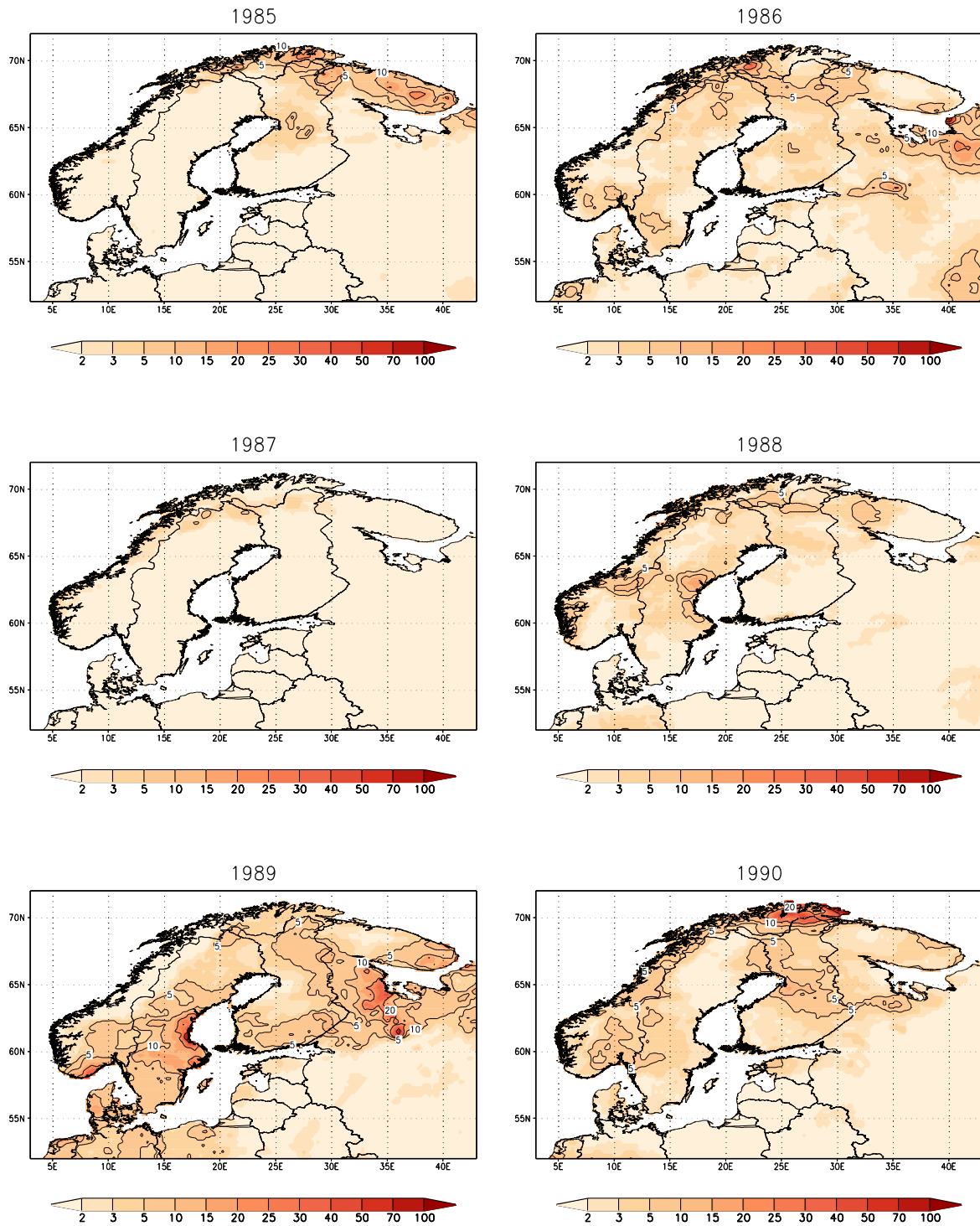


**Kuva L5.** Syyskuun metsäpalariskin (MSR-indeksin) 5, 20, 50 ja 100 vuoden toistuvuustasot. Toistuvuustasot on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.

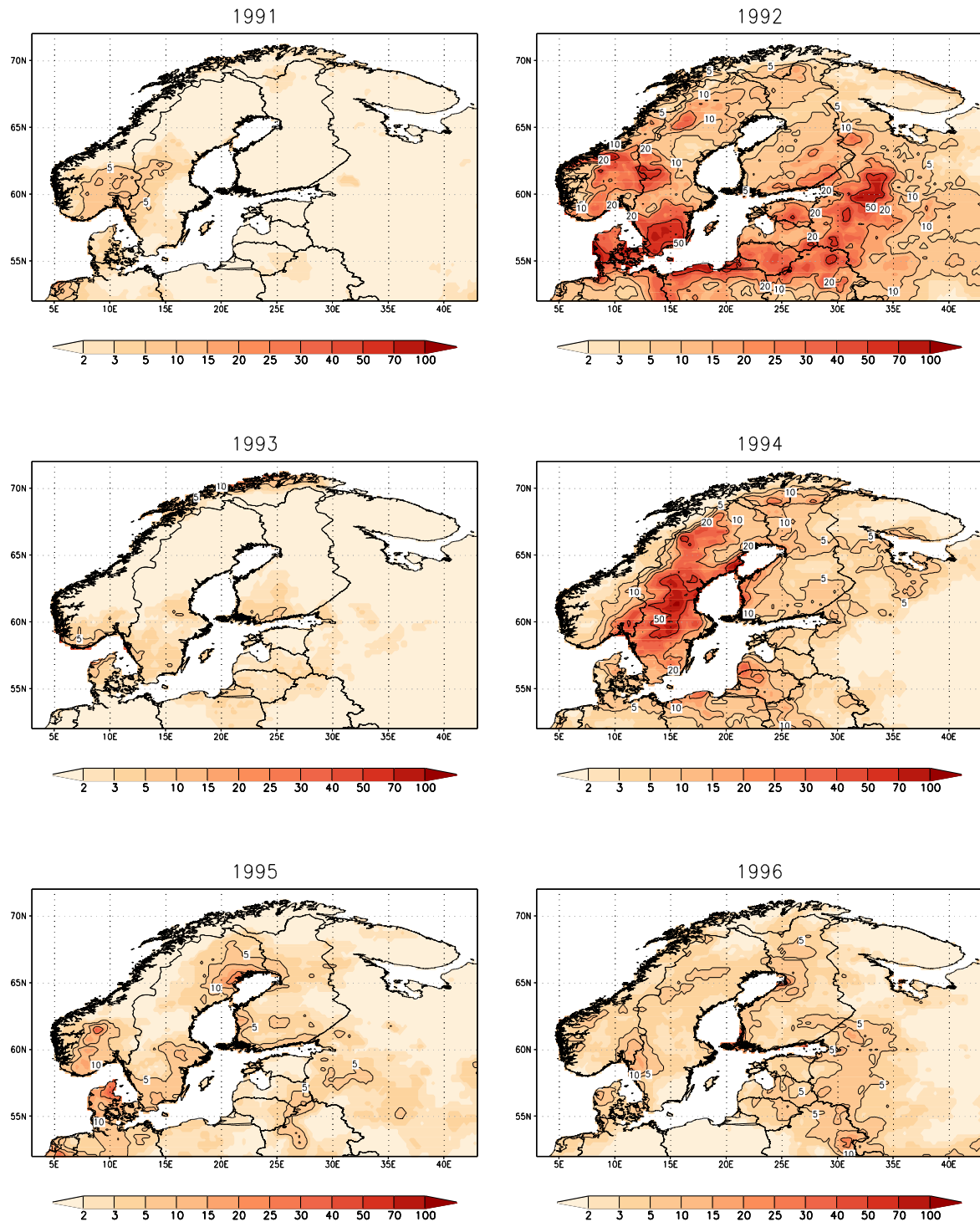


**Kuva L6.** Touko-syyskuun yli keskiarvoistetun metsäpalariskin (SSR-indeksin) toistuvuus-aika (vuosia) vuosina 1979–1984. Toistuvuusajat on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.



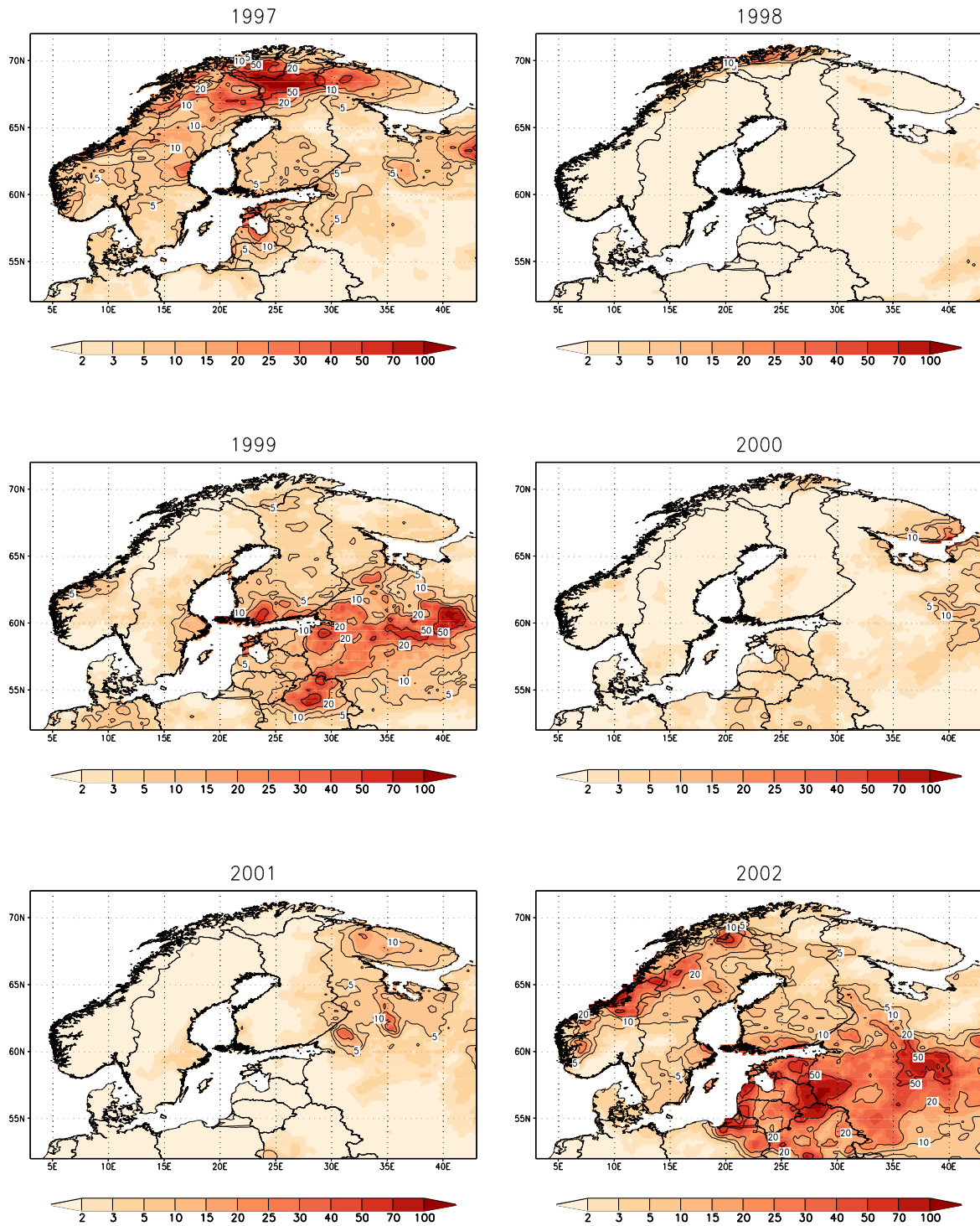


**Kuva L7.** Touko-syyskuun yli keskiarvoistetun metsäpalariskin (SSR-indeksin) toistuvuus-aika (vuosia) vuosina 1985–1990. Toistuvuusajat on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.

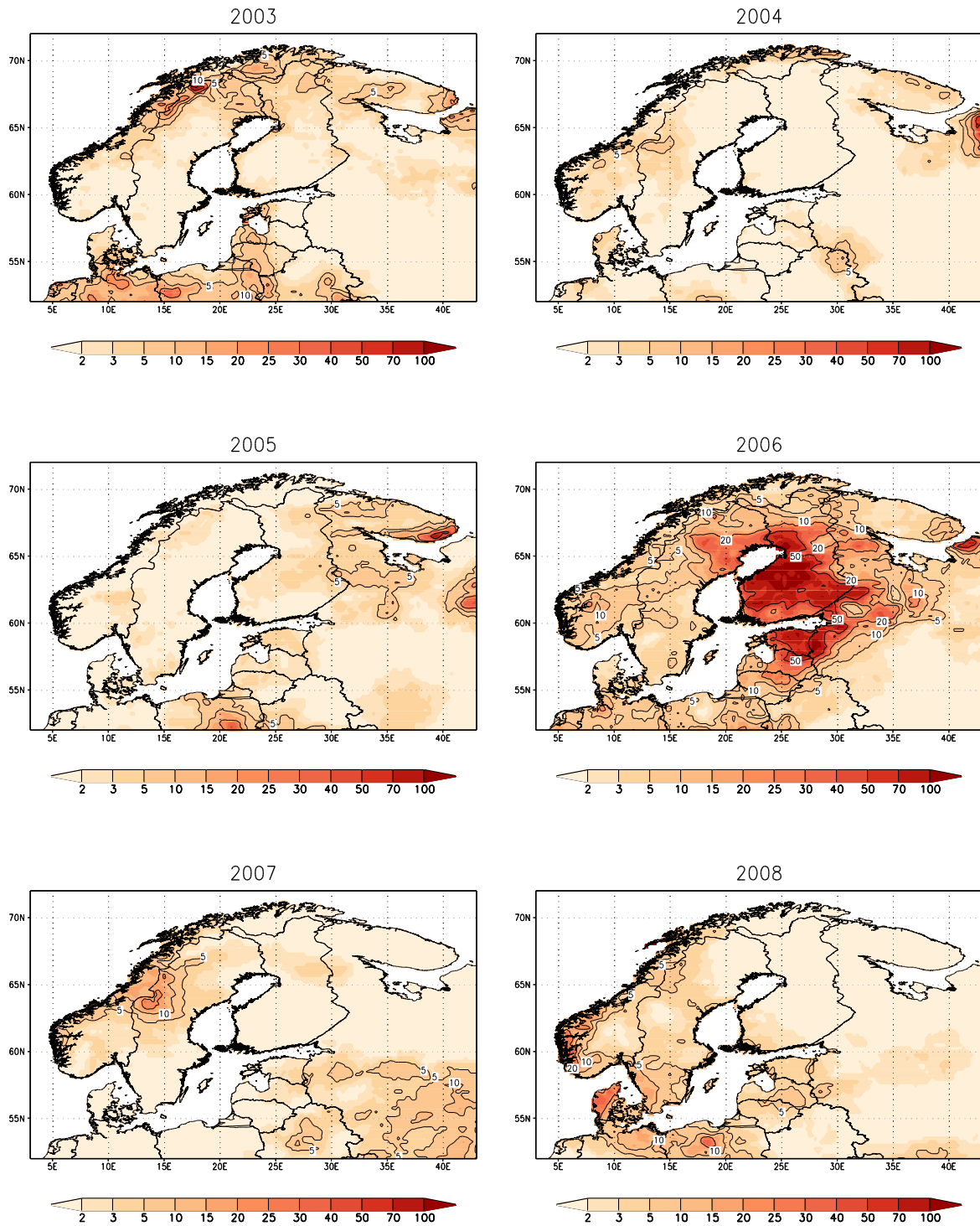


**Kuva L8.** Touko-syyskuun yli keskiarvoistetun metsäpalariskin (SSR-indeksin) toistuvuus-aika (vuosia) vuosina 1991–1996. Toistuvuusajat on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.

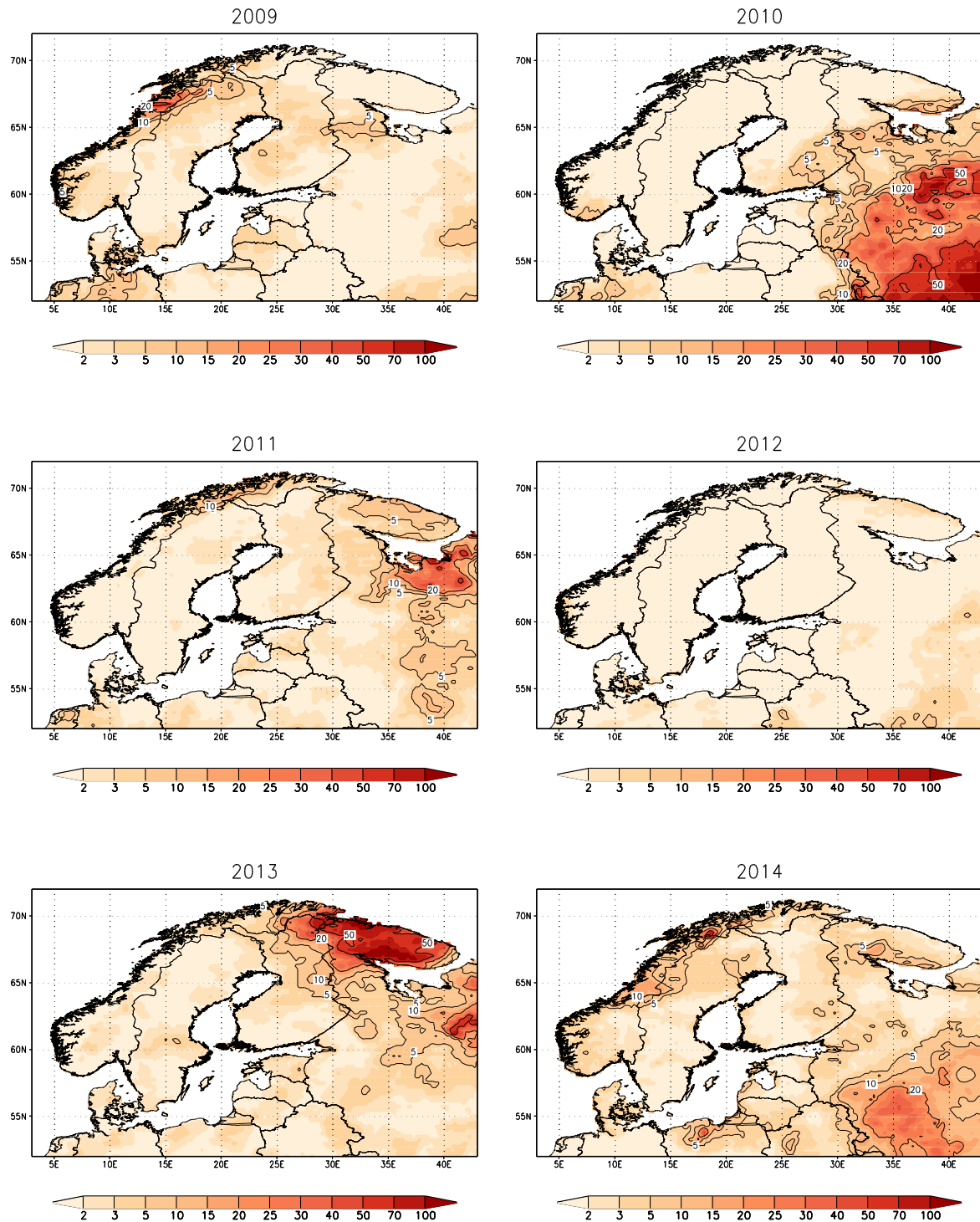




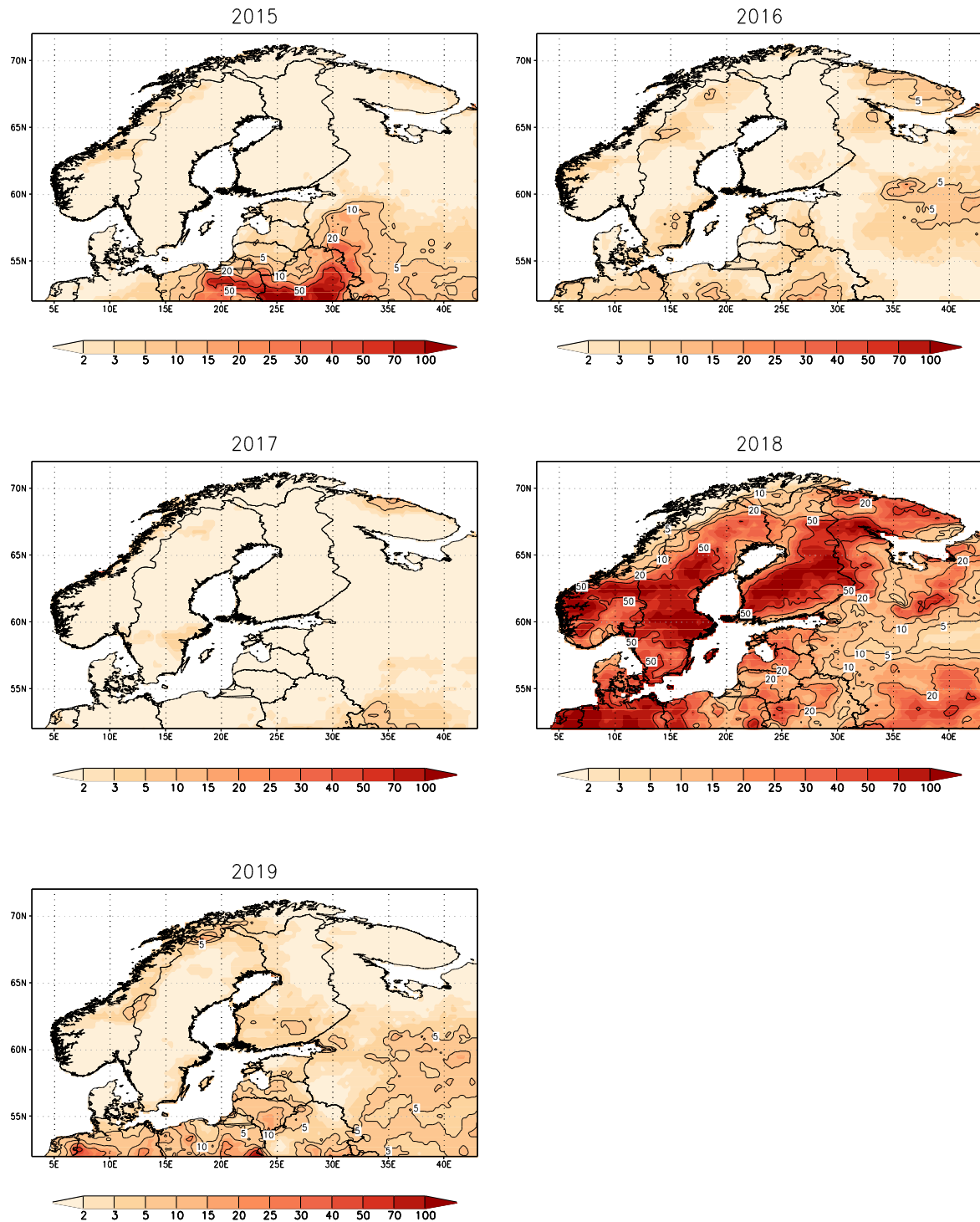
**Kuva L9.** Touko-syyskuun yli keskiarvoistetun metsäpalariskin (SSR-indeksin) toistuvuus-aika (vuosia) vuosina 1997–2002. Toistuvuusajat on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.



**Kuva L10.** Touko-syyskuun yli keskiarvoistetun metsäpalariskin (SSR-indeksin) toistuvuus-aika (vuosia) vuosina 2003–2008. Toistuvuusajat on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.



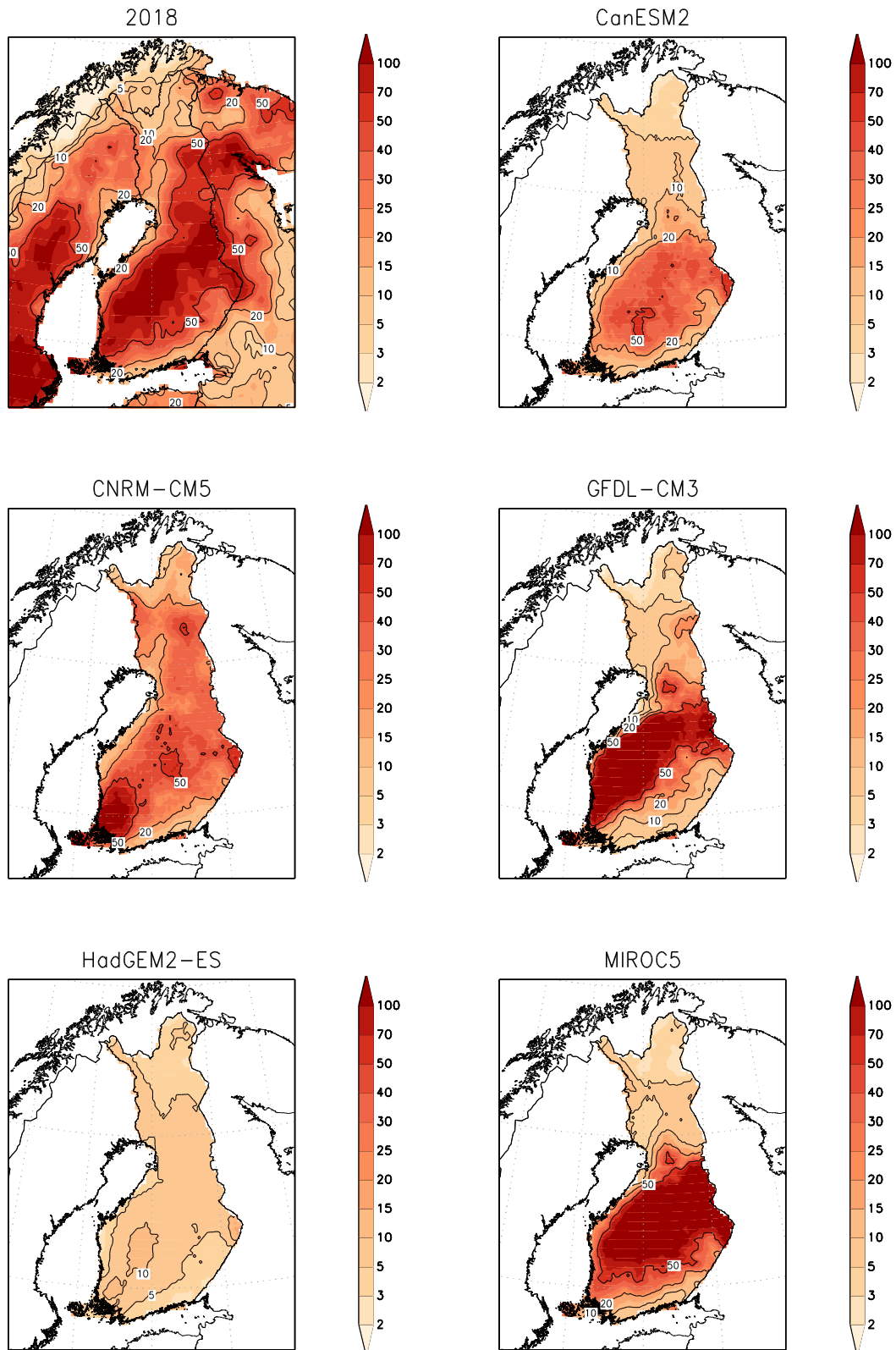
**Kuva L11.** Touko-syyskuun yli keskiarvoistetun metsäpalariskin (SSR-indeksin) toistuvuus-aika (vuosia) vuosina 2009–2014. Toistuvuusajat on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.



**Kuva L12.** Touko-syyskuun yli keskiarvoistetun metsäpalariskin (SSR-indeksin) toistuvuus-aika (vuosia) vuosina 2015–2019. Toistuvuusajat on arvioitu ERA5-uusanalyysiaineistosta jakson 1979–2019 perusteella.

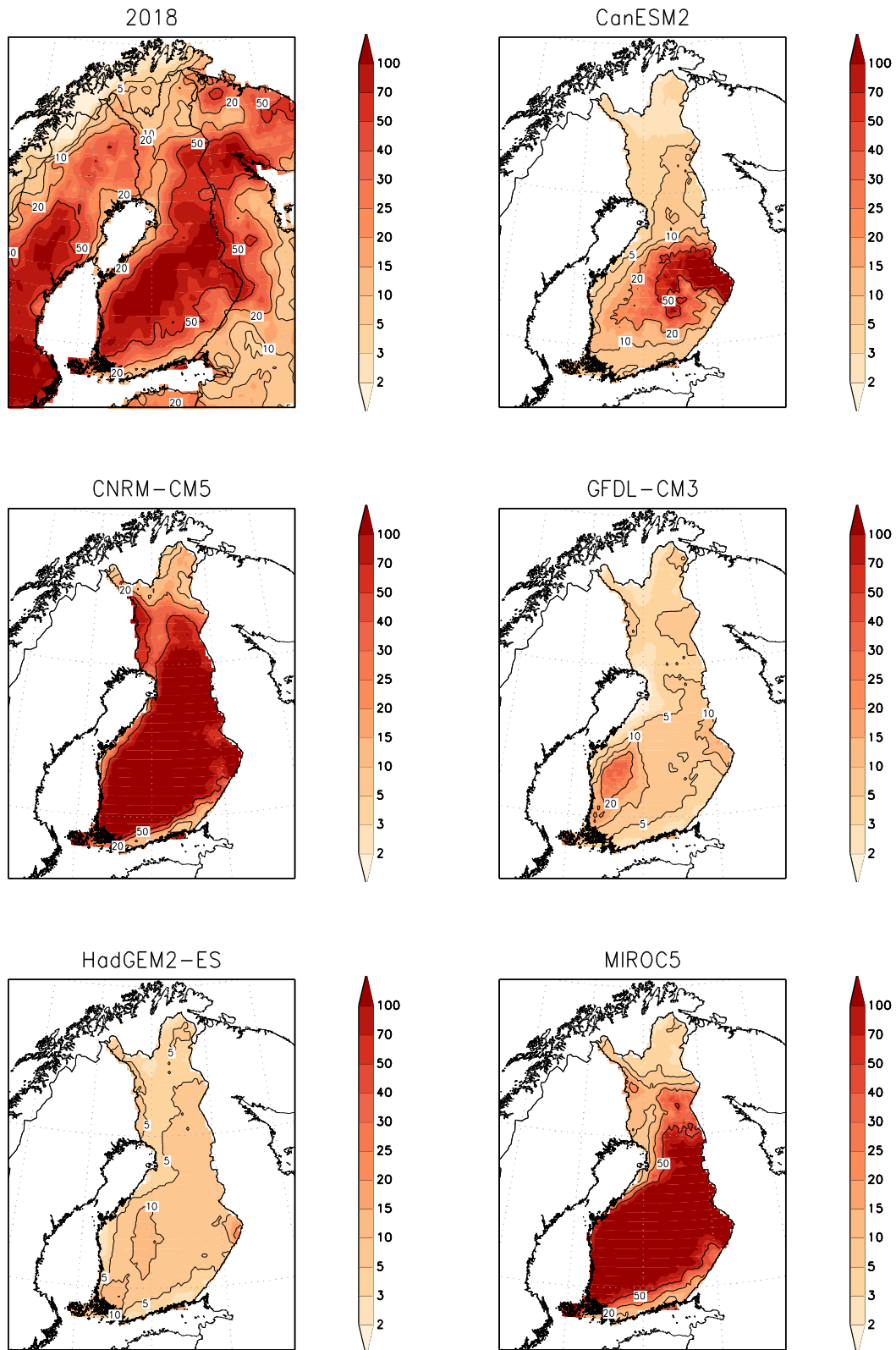


## 2020–2059 RCP4.5



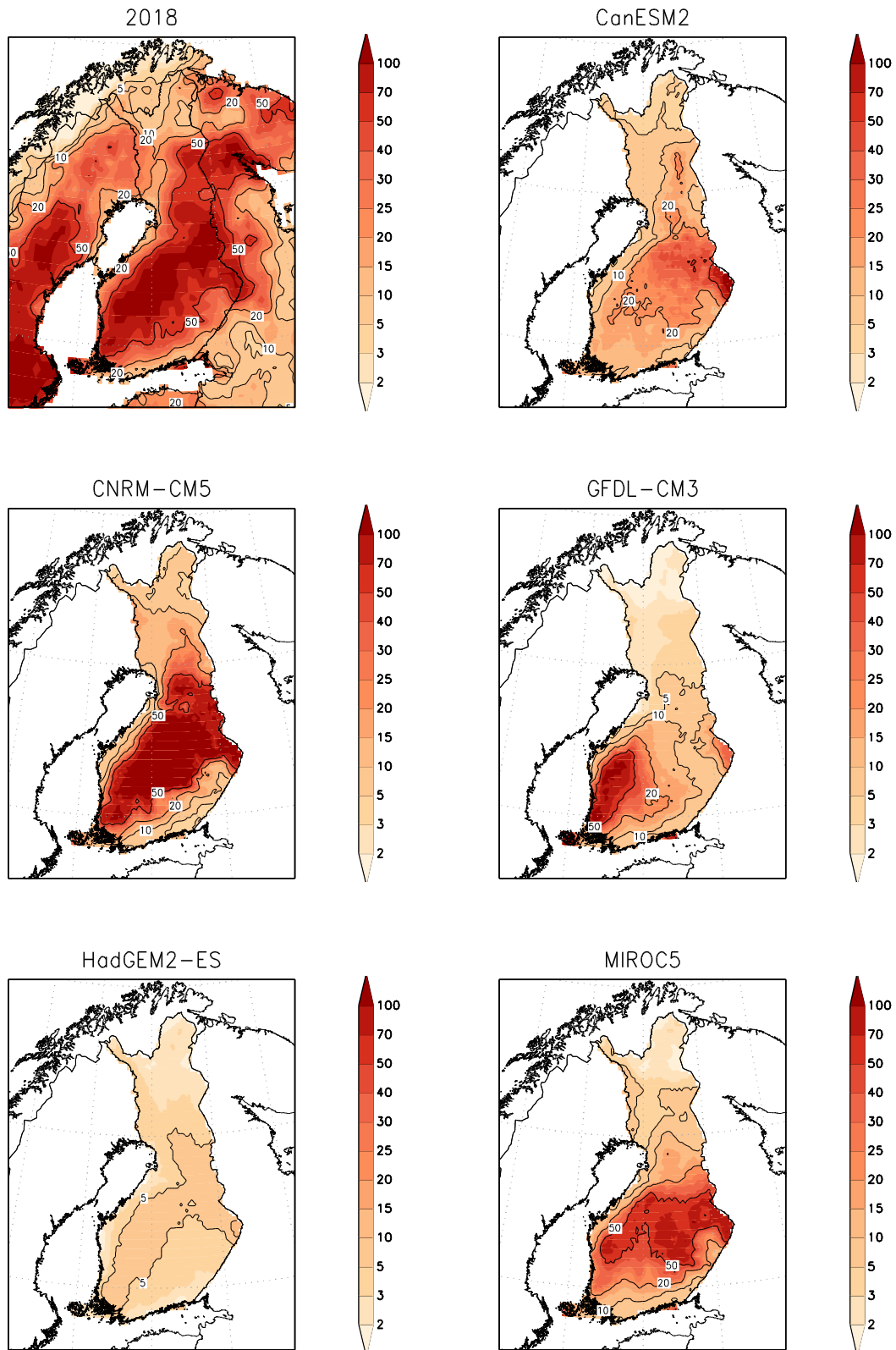
**Kuva L13.** Kesän (touko-syyskuu) 2018 metsäpaloriskin toistuvuusaika (vuosia) ja vastaavan metsäpaloriskin arvioitu toistuvuusaika eri ilmastomuutosmallien tulosten perusteella jaksolla 2020–2059 RCP4.5-päästöskenaarioissa.

## 2020–2059 RCP8.5



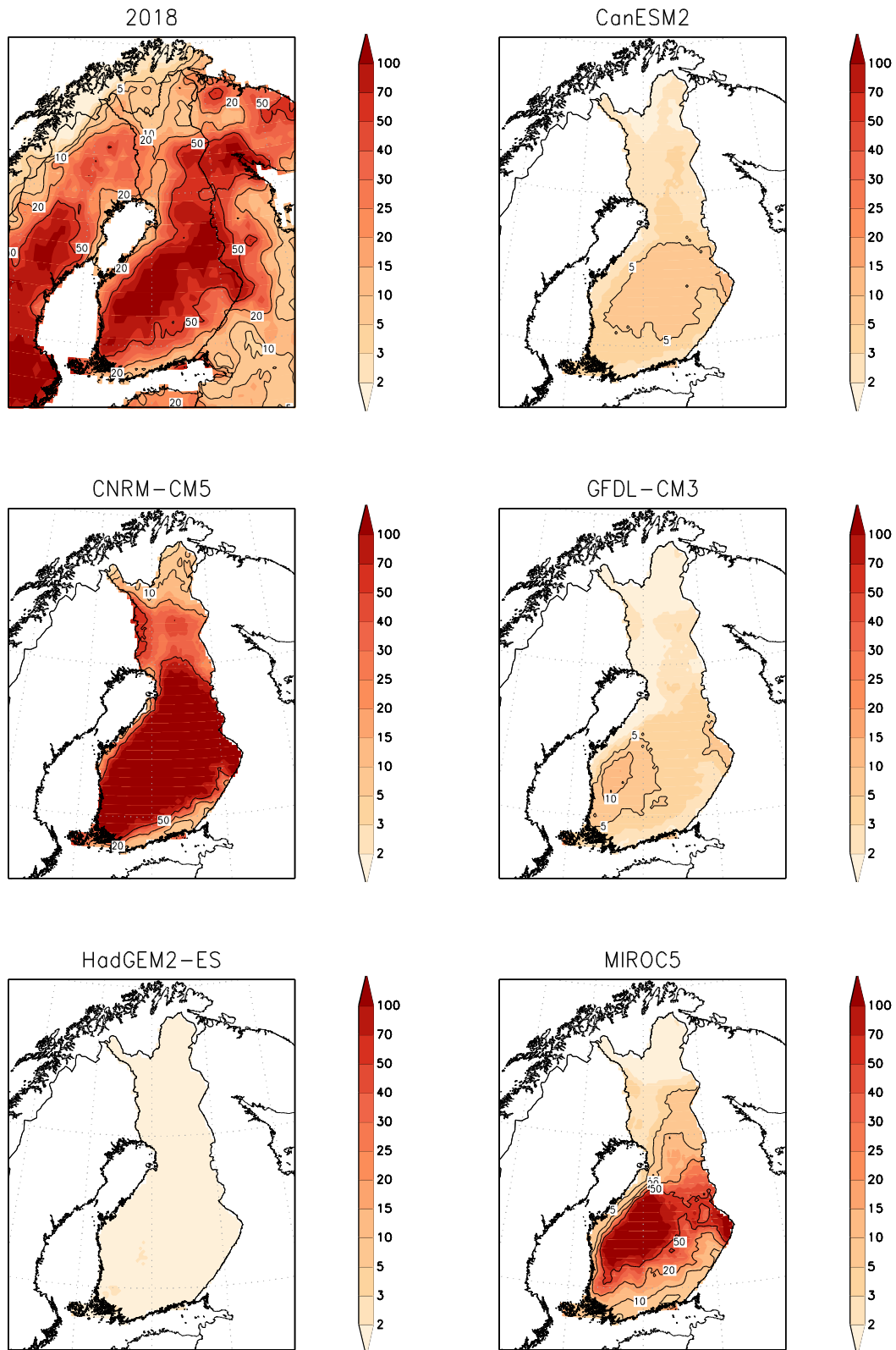
**Kuva L14.** Kesän (touko-syyskuu) 2018 metsäpaloriskin toistuvuusaika (vuosia) ja vastaavan metsäpaloriskin arvioitu toistuvuusaika eri ilmastomuutosmallien tulosten perusteella jaksolla 2020–2059 RCP8.5-päästöskenaarioissa.

## 2060–2099 RCP4.5



**Kuva L15.** Kesän (touko-syyskuu) 2018 metsäpaloriskin toistuvuusaika (vuosia) ja vastaavan metsäpaloriskin arvioitu toistuvuusaika eri ilmastomuutosmallien tulosten perusteella jaksolla 2060–2099 RCP4.5-päästöskenaarioissa.

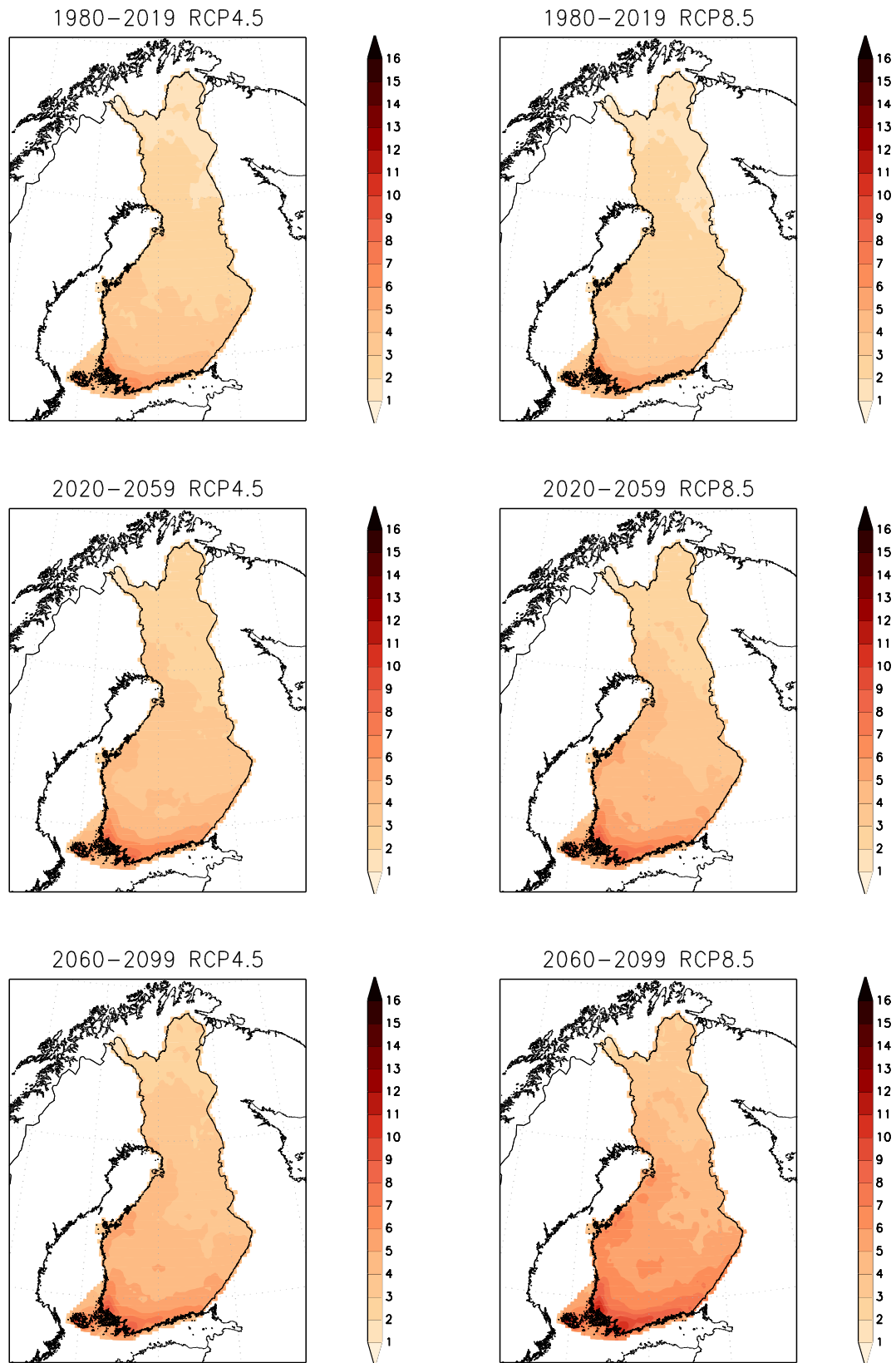
## 2060–2099 RCP8.5



**Kuva L16.** Kesän (touko-syyskuu) 2018 metsäpaloriskin toistuvuusaika (vuosia) ja vastaavan metsäpaloriskin arvioitu toistuvuusaika eri ilmastomuutosmallien tulosten perusteella jaksolla 2060–2099 RCP8.5-päästöskenaarioissa.

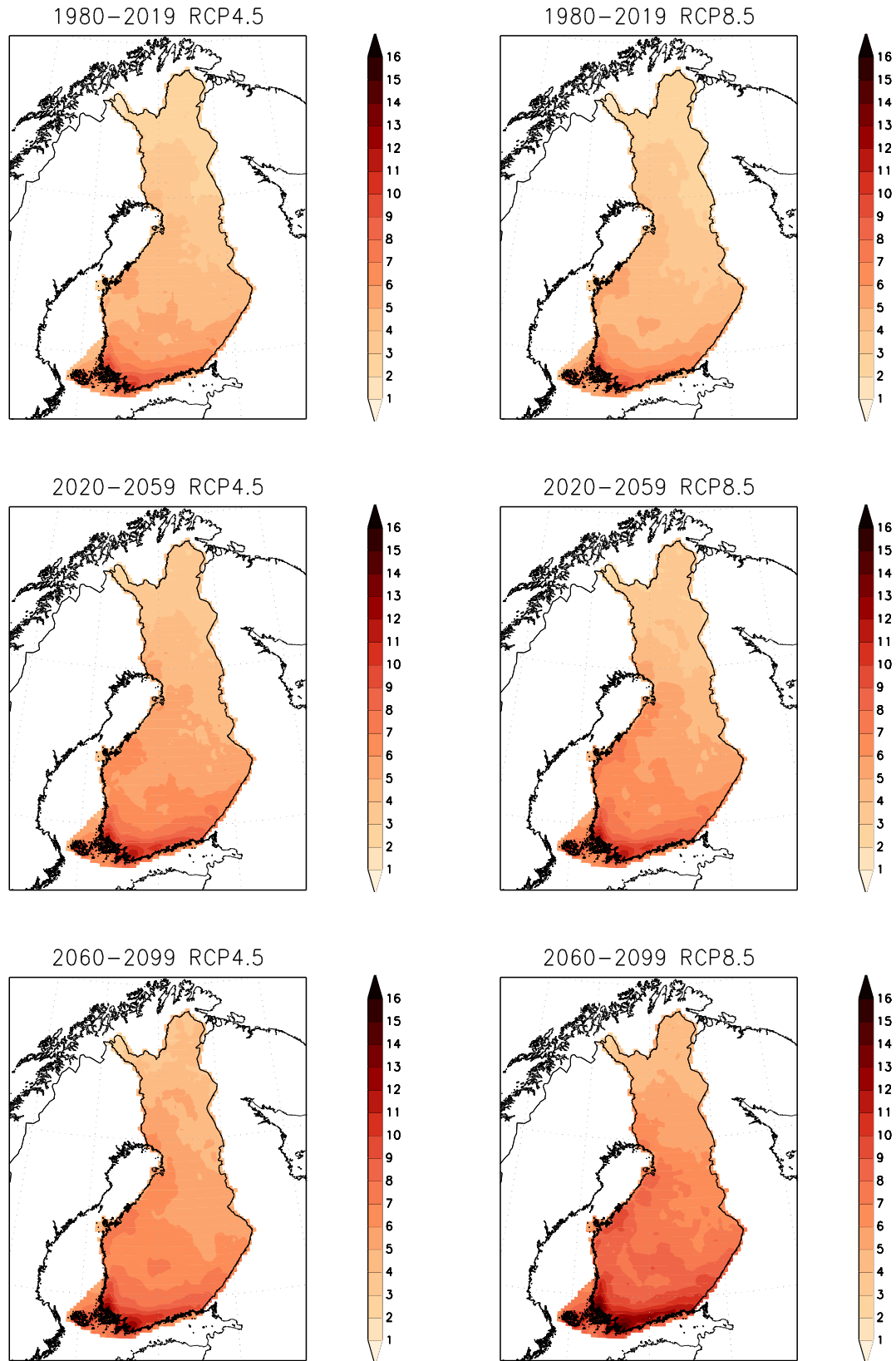


## 5 vuoden toistuvuustaso



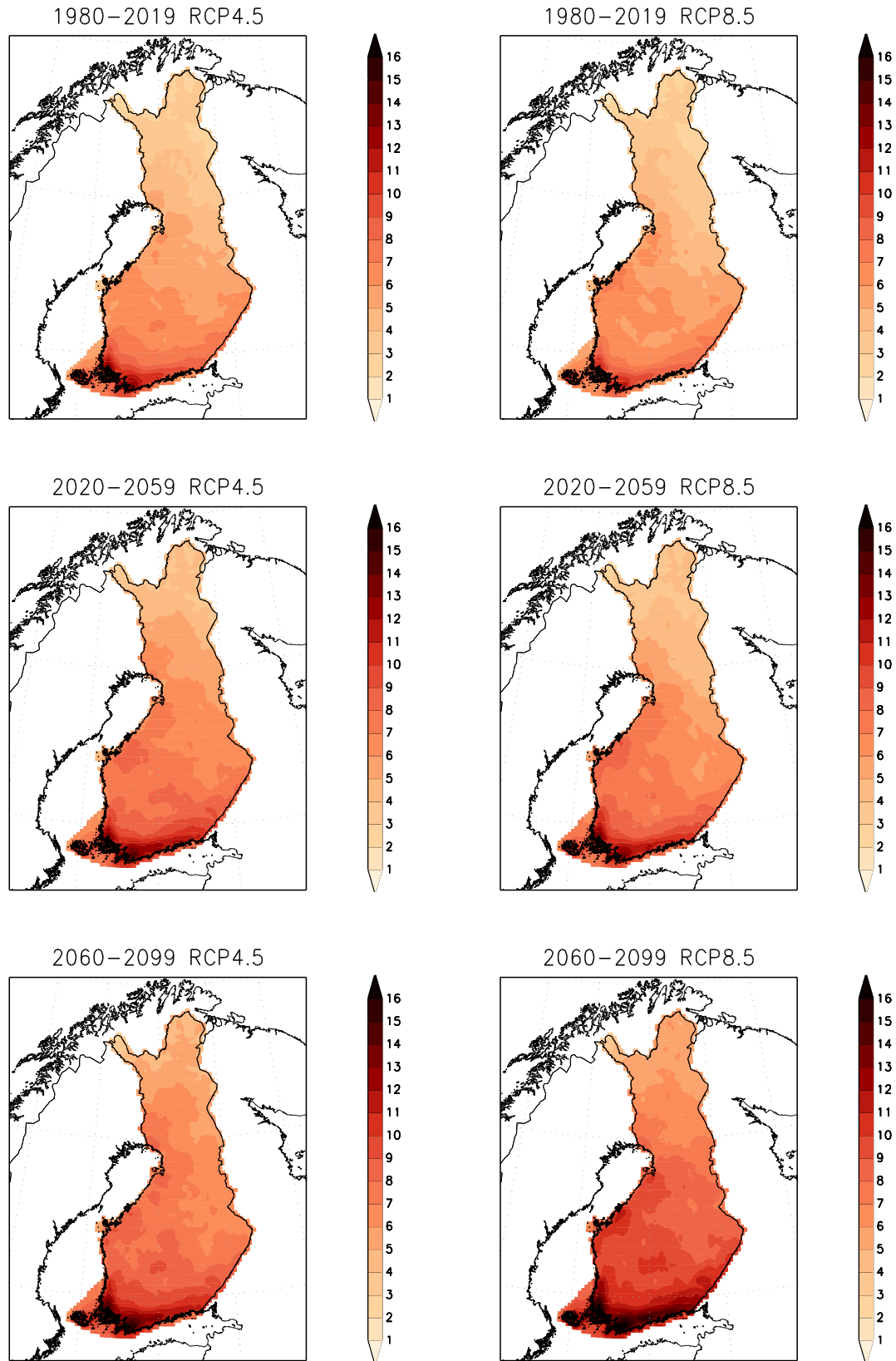
**Kuva L17.** Touko-syyskuun metsäpalariskin (SSR-indeksin) viiden vuoden toistuvuustasot viiden ilmastomuutosmallin harhakorjattujen tulosten keskiarvoista arvioituina jaksoilla 1980–2019, 2020–2059 ja 2060–2099 RCP4.5- ja RCP8.5-päästöskenaarioissa.

## 20 vuoden toistuvuustaso



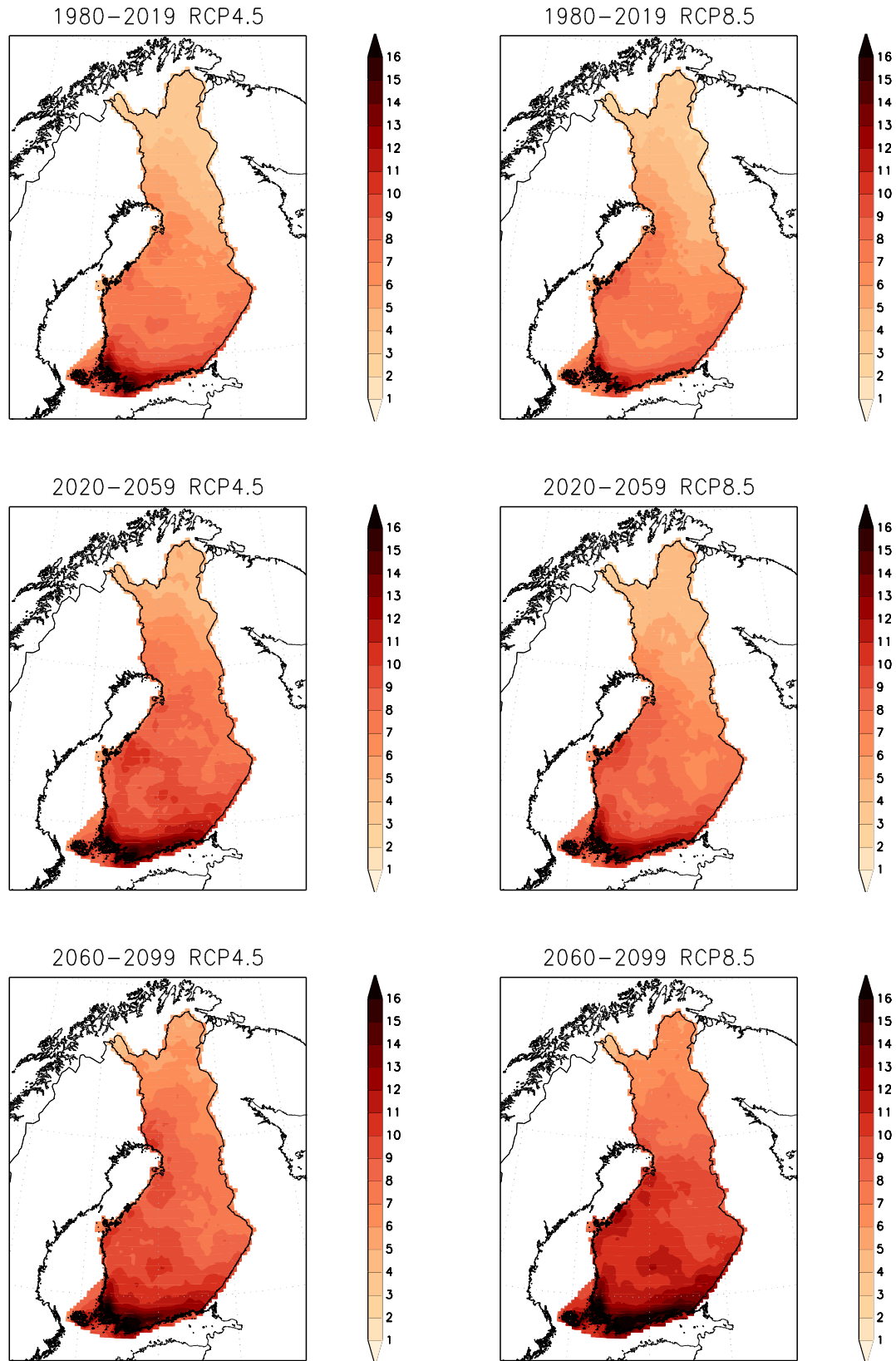
**Kuva L18.** Touko-syyskuun metsäpälöriskin (SSR-indeksin) 20 vuoden toistuvuustasot viiden ilmastomuutosmallin harhakorjattujen tulosten keskiarvoista arvioituina jaksoilla 1980–2019, 2020–2059 ja 2060–2099 RCP4.5- ja RCP8.5-päästöskenaarioissa.

## 50 vuoden toistuvuustaso



**Kuva L19.** Touko-syyskuun metsäpälöriskin (SSR-indeksin) 50 vuoden toistuvuustasot viiden ilmastomuutosmallin harhakorjattujen tulosten keskiarvoista arvioituina jaksoilla 1980–2019, 2020–2059 ja 2060–2099 RCP4.5- ja RCP8.5-päästöskenaarioissa.

## 100 vuoden toistuvuustaso



**Kuva L20.** Touko-syyskuun metsäpaloriskin (SSR-indeksin) 100 vuoden toistuvuustasot viiden ilmastomuutosmallin harhakorjattujen tulosten keskiarvoista arvioituna jaksoilla 1980–2019, 2020–2059 ja 2060–2099 RCP4.5- ja RCP8.5-päästöskenaarioissa.